

УДК.621.3.048.1

**А. Н. Рассальский**<sup>1</sup> канд. техн. наук, А. А. Сахно<sup>1</sup>, С. П. Конограй<sup>1</sup>, А. В. Козлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет

<sup>2</sup>Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ТОКА КОМПЛЕКСНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ОСНОВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

*Представлена разработанная методика измерения тока комплексной проводимости основной изоляции высоковольтных аппаратов 110–750 кВ при диагностике под рабочим напряжением. Предложен алгоритм математической обработки сигнала для минимизации влияния помех. Методика может быть использована для диагностики высоковольтных трансформаторов тока, вводов, нелинейных ограничителей перенапряжений и другой высоковольтной аппаратуры в условиях эксплуатации.*

**Ключевые слова:** трансформатор, изоляция главная, диагностика, ток проводимости, обработка сигнала.

### Введение

В настоящее время в Украине, как и во всем мире, сложилась тенденция «старения» парка электрооборудования. Ежегодный рост электропотребления на 2,5–3,1 % в Украине, а также повышение требований к снабжению потребителей ставят новые задачи по повышению эксплуатационной надежности оборудования подстанций (ПС). Измерительные трансформаторы 330–750 кВ являются одним из самых аварийно-опасных звеньев энергосистем, в большинстве случаев аварии трансформаторов тока (ТТ) сопровождаются полным разрушением аппарата, а иногда и соседнего оборудования. Анализ данных об отказах [1] свидетельствует о том, что наиболее характерными дефектами для ТТ 330–750 кВ являются местные дефекты, развитие которых приводит либо к тепловому пробую, либо к появлению частичных разрядов и электрическому пробую основной изоляции. Такие дефекты на ранней стадии развития могут быть обнаружены измерением тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg}\delta_1$ ) под рабочим напряжением. Проведенный анализ данных по отбраковке трансформаторов тока 330–750 кВ в Днепровской электроэнергетической системе свидетельствует о том, что около 65 % трансформаторов тока были забракованы именно по результатам контроля тангенса угла диэлектрических потерь.

Периодический контроль состояния изоляции, а также контроль при пониженном напряжении имеют ряд недостатков: первый и самый важный из них заключается в том, что дефекты в изоляции могут развиваться за срок до двух недель, поэтому периодический, даже учащенный, контроль не всегда позволяет вовремя за-

фиксировать дефект. Опытные измерения, которые проводятся на отключенном трансформаторе, меньше подвержены влиянию помех, однако они не учитывают специализированные процессы в изоляции, возникающие только под рабочим напряжением. Например, увеличение  $\text{tg}\delta_1$  бумажно-масляной изоляции может быть вызвано процессами, связанными с длительно протекающими частичными разрядами сравнительно небольшой интенсивности, при этом появляется существенная зависимость  $\text{tg}\delta_1$  от величины и длительности приложенного напряжения [2]. Также при периодическом контроле отсутствует возможность использования ряда вспомогательных факторов, позволяющих лучше выявить дефекты (например, температурный коэффициент и влагосодержание изоляции).

### Цель работы

При контроле  $\text{tg}\delta_1$  и емкости основной изоляции ( $C_1$ ) единственным измеряемым сигналом является ток комплексной проводимости изоляции аппарата ( $I_{\text{КП}}$ ). При его измерении возникают две основные проблемы:

1. Создание безопасной стационарной схемы подключения к аппарату.
2. Расчет  $\text{tg}\delta_1$  и  $C_1$  в условиях высокого уровня эксплуатационных помех.

В данной работе представлены основные аппаратные решения и разработанная методика для измерения тока комплексной проводимости основной изоляции высоковольтных аппаратов 110–750 кВ при диагностике под рабочим напряжением. Предложен алгоритм математической обработки сигнала для минимизации помех, успешно прошедший эксплуатационные испытания.

### Измерение тока комплексной проводимости

Ток комплексной проводимости – это ток, протекающий через изоляцию аппарата под воздействием приложенного фазного напряжения. Измерение  $I_{КИ}$  под рабочим напряжением возможно только при прямой схеме измерительной установки. Для каждого типа оборудования, в зависимости от его конструктивного исполнения, присоединение возможно к специальному (ПИН) выводу, к измерительному выводу, или к нижнему фланцу аппарата, если он изолирован от земли. Такими аппаратами являются вводы, трансформаторы тока (ТТ), конденсаторы связи, нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

На рисунке 1 представлена схема подключения системы непрерывного контроля к измерительному выводу изоляции трансформатора тока либо ввода.

Схемы устройства присоединения (УПР) и устройства подключения (УПД) утверждены в НЭК «Укрэнерго» [3].

УПР и УПД применяются для периодического контроля изоляции ТТ под рабочим напряжением и могут быть использованы для подключения систем непрерывного контроля. Главная опасность при непрерывном контроле – это превышение допустимого напряжения на измерительной обкладке изоляции аппарата. Такое превышение может возникать вследствие обрыва цепи соединения измерительного вывода с заземлением и

возникновения высокочастотных перенапряжений в сети, что приведет к пробое изоляции между измерительным или специальным выводом и землей и мгновенному повреждению аппарата. Наиболее опасные перенапряжения возникают при эксплуатационных переключениях разъединителями холостых участков шин высоковольтных подстанций. Каждая такая коммутация сопровождается импульсами с амплитудой, в несколько раз большей номинальной, и частотами 100 кГц–10 МГц [4]. Именно поэтому УПР должно быть оснащено варистором и разрядником. Варистор имеет более крутую характеристику срабатывания, чем разрядник, однако разрядник позволяет принимать на себя более мощные импульсы тока. Важной особенностью этих защитных приборов является то, что в случае теплового пробоя варистора он замыкается «накоротко» и замыкает измерительную цепь, тем самым защищая изоляцию аппарата от повреждения. Разрядник при выходе из строя замыкания вывода на землю может и не создать, поэтому его отдельное использование недопустимо. Резисторы, используемые в УПР, обязательно должны иметь обратную зависимость величины полного сопротивления от частоты приложенного напряжения (емкостной характер). УПР, согласно требованиям НЭК «Укрэнерго», должно выступать как устройство защиты только в момент самого измерения, в остальное время измерительный вывод должен быть глухо заземлен [5].

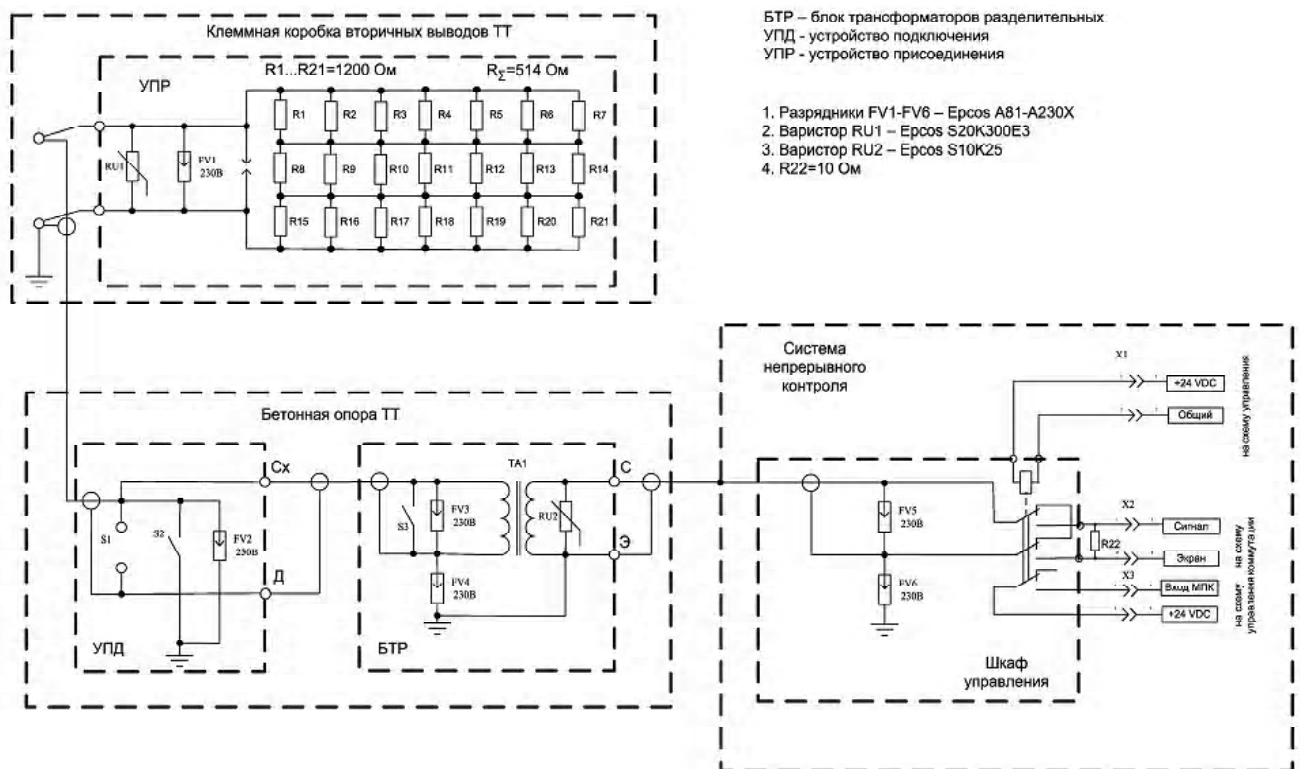


Рис. 1. Схема подключения системы непрерывного контроля к измерительному выводу трансформатора тока (ввода)

Для устранения помех, связанных с неэквипотенциальностью точек заземления элементов измерительной цепи – так называемых помех общего вида – заземляется только датчик, при этом схема измерительного прибора должна быть изолирована от корпуса, заземленного на месте установки. Также для устранения помехи возможно выполнение гальванического разделения цепей при помощи трансформатора, устанавливаемого около УПР. В НЭК «Укрэнерго» входы измерительного устройства по согласованию с Запорожским заводом высоковольтной аппаратуры принято считать частью цепей заземления измерительных выводов ТТ [5]. Поэтому к этим частям предъявляются такие же требования ПУЭ, как и ко всей цепи заземления, т.е. не должно быть разъединяющих приспособлений (рубильников, выключателей, автоматических выключателей, контактов реле). Сочленение частей заземляющего проводника допускается выполнять по второму классу соединений (ГОСТ 10434-82) с возможностью осмотра. К этому классу относятся болтовые контактные соединения.

Исходя из этого, на подстанциях НЭК «Укрэнерго» необходимо применять разделительные трансформаторы тока с первичной обмоткой, намотанной медным проводом сечением не менее 2,5 мм<sup>2</sup> и защищенной от импульсных перенапряжений разрядником, варистором или защитными стабилитронами. Разделительный трансформатор тока должен быть выполнен таким образом, чтобы при обрыве его вторичной цепи и защитных элементов пики напряжения на первичной обмотке не превышали 1,0–1,2 кВ при протекании синусоидальных токов промышленной частоты величиной 30–120 мА [5]. Такой трансформатор тока разработан и изготовлен авторами статьи, но требует проведения ряда испытаний на возможность его применения. Использование его в эксплуатации недопустимо, так как на данный момент не исследована его работа в условиях высокочастотных перенапряжений. В энергокомпаниях, не предъявляющих таких требований к заземлению измерительного вывода, блок разделительных трансформаторов предпочтительно не использовать, т.к. ввиду угловой погрешности он вносит искажение при измерении начальной фазы тока комплексной проводимости. Например, для класса точности ТТ 0.1 допустимая погрешность 0.15 град. при 120 %-ном первичном токе приведет к такой же погрешности при расчете  $\text{tg}\delta_1$ . А также следует помнить, что подобный трансформатор содержит около 1000 витков в первичной обмотке и представляет собой индуктивное сопротивление в цепи заземления, которое особенно опасно при высокочастотных перенапряжениях.

Для исключения влияния реального значения сопротивления и температурной нестабильности резисторов УПР авторы предлагают реализовывать алгоритм двойного измерения, с 20-омным шунтом на входе измерителя и без него, перед каждым измерением для всех ТТ.

$$\begin{aligned} u_1 &= -i \cdot r_u, \\ u_2 &= -i_2 \cdot r_{sh}, \\ i_1 \cdot r_u &= i_2 \cdot (r_{sh} + r_k), \\ i_1 + i_2 &= i. \end{aligned}$$

Решение данной системы

$$r_u = \frac{(u_1 - u_2) \cdot r_{sh}}{u_2} - r_k,$$

где  $u_1, u_2$  – значения напряжения при первом и втором измерении,

$r_k, r_{sh}, r_u$  – активное сопротивление кабеля, шунта и УПР,  $i, i_1, i_2$  – полный ток комплексной проводимости, ток через УПР и ток через шунт при втором измерении.

Использование перекрестного алгоритма измерения, который подразумевает использование каждого объекта контроля как в качестве эталонного, так и в качестве контролируемого, позволяет избежать ошибок при изменении характеристик изоляции эталонных ТТ, а также уменьшить зависимость результата от токов влияния [6].

Все каналы измерения должны иметь гальваническую развязку, а герметичный электротехнический шкаф должен быть заземлен на месте установки для исключения возможности прикосновения персонала к цепям заземления объектов.

Для исключения емкостных и электромагнитных наводок линии связи между датчиком и измерительной установкой должен применяться радиочастотный коаксиальный кабель (типа РК).

Желательно, чтобы в качестве эталонных объектов использовались объекты с большим током утечки. Так, например, действующее значение тока утечки элегазового ТТ ТОГ-330 может составлять всего 15–20 мА, а ток маслonaполненного ТФУМ-330 50 мА. Преобразование токового сигнала в напряжение для измерения необходимо производить непосредственно на входе АЦП, а не у источника сигнала. Обязательным условием корректных измерений является экранирование системы измерения и исключение влияния неэквипотенциальности точек заземления эталонных и контролируемых объектов.

Измерение емкости является более простой задачей, и контроль ее с необходимой точностью, как правило, не вызывает трудностей даже в условиях эксплуатации, а вот результаты измерений  $\text{tg}\delta_1$  требуют высокой точности и более подвержены влияниям эксплуатационных факторов. Одним из основных источников погрешности при измерении в эксплуатации являются помехи. Коронные разряды на проводах, арматуре и оборудовании, частичные разряды как в контролируемом, так и в соседнем оборудовании, коммутационные перенапряжения и многое другое могут вызывать непериодические помехи на измеряемом сигнале (рис. 2). Измерение разности начальных фаз токов на

нефильтрованном сигнале дает относительную погрешность измерения 10–1000 %, что полностью обесценивает результаты диагностики.

Разработанный авторами способ фильтрации случайных непериодических помех – это математическая фильтрация осциллограммы тока. Алгоритм основан на аппроксимации полиномами Чебышева [7]. Наибольшее отклонение при аппроксимации синусоиды полиномами получается на границах интервала, поэтому аппроксимацию периода синусоидального напряжения необходимо проводить на интервале  $(\pi \pm 0,15\pi)$ . Для аппроксимации такой кривой необходимо использовать полином не менее 6-го порядка.

Амплитудная погрешность при такой аппроксимации составляет до 0,2 %, а угловая погрешность может достигать 0,01 рад, что является недопустимым при определении тангенса угла диэлектрических потерь. Поэтому предлагается разбивать данный интервал на два интервала и проводить аппроксимацию каждого

полиномами 6-го порядка.

Для исследования угловой погрешности, вносимой фильтром, была создана модель, в которой на исходные сигналы  $y_1(t) = \sin(\omega \cdot t)$  и  $y_2(t) = 0,6 \cdot \sin(\omega \cdot t + 0,002)$ , где  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ , а  $f = 50$  Гц, накладывались аperiодические случайные помехи при помощи генератора случайных чисел, встроенного в платформу Microsoft.NET 3.5. В таблице 1 представлены результаты измерения  $\text{tg} \delta \cdot 10^2$  между двумя векторами сигналов при различных значениях амплитуды помехи. На практике помехи имеют высокую частоту, большую, чем частота дискретизации АЦП (100 кГц), поэтому при опыте частота генерируемых помех составляла 100 кГц.

Амплитуда помех варьируется на практике в диапазоне 0,1–0,25 В при измерении тока комплексной проводимости на шунте 20 Ом. В таблице 2 представлены результаты статистической обработки результатов.

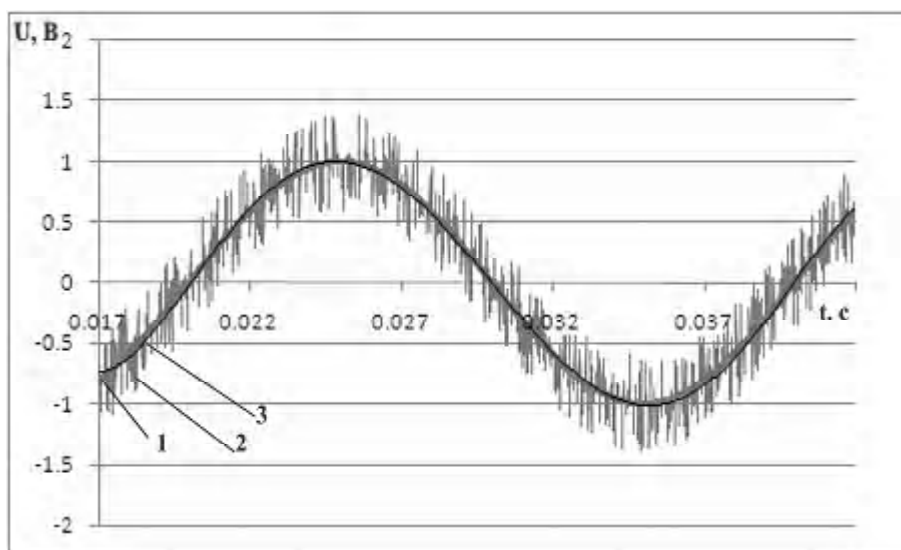


Рис. 2. Аппроксимация сигнала тока комплексной проводимости основной изоляции аппарата:

1 – исходный сигнал; 2 – искаженный помехами сигнал; 3 – аппроксимирующая кривая

Таблица 1 – Результаты исследования

№ Измерения Амплитуда помехи, В	№									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1	0,2269	0,1986	0,2383	0,2039	0,1322	0,2606	0,2156	0,2426	0,1584	0,2359
0,2	0,2294	0,1066	0,2785	0,1658	0,24	0,1935	0,1806	0,1211	0,134	0,2324
0,3	0,1926	0,2646	0,1704	0,2117	0,2819	0,2128	0,2449	0,2407	0,1456	0,266
0,4	0,2506	0,2046	0,2514	0,2341	0,2255	0,1853	0,2104	0,241	0,2311	0,1211

Таблиця 2 – Обработка результатов

Амплитуда помехи, В Параметр	0,1	0,2	0,3	0,4
Среднее	0,2113	0,18819	0,22312	0,21551
Стандартная ошибка	0,012595175	0,018004515	0,014045535	0,012395613
Медиана	0,22125	0,18705	0,22675	0,2283
Стандартное отклонение	0,039829442	0,056935274	0,044415883	0,039198369
Дисперсия выборки	0,001586384	0,003241625	0,001972771	0,001536512

**Выводы**

Разработаны основные требования к схемам подключения для систем непрерывного контроля состояния основной изоляции высоковольтных трансформаторов тока и вводов с учетом действующих на территории Украины нормативных документов, рекомендаций производителей и ведущих эксплуатирующих организаций. Приведенная схема подключения без использования разделительного трансформатора успешно эксплуатируется на подстанции «Днепр-Донбасс 330» Запорожских магистральных сетей на протяжении двух лет.

Разработанный алгоритм математической фильтрации помех для контроля характеристик изоляции под рабочим напряжением, в соответствии с результатами моделирования, позволяет проводить измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции с погрешностью до 0,05 ед., что является допустимым при непрерывном контроле.

В разработанном алгоритме величина погрешности не зависит от амплитуды помехи в диапазоне помех от 0,1 до 0,4 В.

Максимальное отклонение результатов при цикле из двадцати измерений под рабочим напряжением на одной паре трансформаторов тока 330 кВ составляет 0,03 ед.

Представленный алгоритм внедрен и успешно используется в системе непрерывного контроля основной изоляции трансформаторов тока 330 кВ на подстанции «Днепр-Донбасс 330» Запорожских магистральных сетей Днепровской электроэнергетической системы КП НЭК «Укрэнерго».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гречко О. Н. Повреждаемость маслонаполненных трансформаторов тока 110–750 кВ и меры по по-

вышению их надежности в эксплуатации / О. Н. Гречко, А. Ф. Курбатова, В. А. Родионов // Новое в российской электроэнергетике. – 2003. – № 2. – С. 30–43.

2. Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения / Сви П. М. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.

3. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330–750 кВ під робочою напругою : СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301-2006. – Офіц. вид. – К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2006. – 31 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).

4. Напряжение на первичных обмотках трансформаторов тока 330–750 кВ при высокочастотных перенапряжениях / [Черноготский В. М., Шлыков А. Г., Запояско В. В., Третьяк Б. С.] // Трансформаторостроени : XII междунар. науч.-техн. конф., 7–11 сент. 2009 г. : докл. – 19, – 2009. – 6 с.

5. Шинкаренко Г.В. Технічні вимоги до систем безперервного контролю трансформаторів струму 330–750 кВ під робочою напругою / Шинкаренко Г. В. // Вимірювальні оливо наповнені трансформатори струми і напруги 110–750 кВ. Діагностика. Рекомендації щодо продовження ресурсу : засідання електроенергетической секції науково-технічного совета НЭК «Укрэнерго» 17–21 нояб. 2008 г. : докл. – 6, 2008. – 13 с.

6. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330–750 кВ / Рассальский А. Н., Сахно А. А., Конограй С. П. и др. // Вісник КДПУ ім. Михайла Остроградського. – 2009. – № 3(56), Ч. 1. – С. 67–70.

7. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация / Г. Лэм ; [пер. с англ. В. Л. Левин, М. Н. Микшис, И. Н. Теплюк, под. ред. И. Н. Теплюка]. – М. : Мир, 1982. – 592 с.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2010 р.

[Рассальський О. М.], Сахно О. А., Конограй С. П., Козлов О.В. Методика вимірювання та обробки струму комплексної провідності головної ізоляції високовольтних апаратів 110–750 кВ при діагностуванні під робочою напругою

*Представлено розроблену методику вимірювання струму комплексної провідності головної ізоляції високовольтних апаратів 110–750 кВ при діагностуванні під робочою напругою. Запропоновано алгоритм математичної обробки сигналу для мінімізації експлуатаційних завод. Методика може бути використана для діагностики високовольтних трансформаторів струму, ввідів, нелінійних обмежувачів напруги та іншої апаратури в умовах експлуатації.*

**Ключові слова:** трансформатор, ізоляція головна, діагностика, струм провідності, обробка сигналу.

[Rassalsky A.], Sakhno A., Konogray S., Kozlov A. Measuring and processing technique of complex conduction current of 110–750 kV high-voltage equipment basic insulation at diagnostics under operating voltage

*The developed technique of complex conduction current measurement during on-line testing of 110–750 kV high-voltage equipment basic insulation is described. The algorithm of mathematical signal processing for operating noise minimization is proposed. The technique can be used for diagnostics of high-voltage current transformers, bushings, nonlinear voltage limiters and other equipment in operating conditions.*

**Key words:** transformer, basic insulation, diagnostics, conduction current, signal processing.

УДК 621.313

А. А. Колесников, А. Г. Лохматов канд. техн. наук

Запорізька державна інженерна академія

## ПРОГНОЗУЮЧЕ РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНЕ РЕГУЛЮВАННЯ СТАТОРНОГО СТРУМУ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З МАТРИЧНИМ БЕЗПОСЕРЕДНІМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ

*Запропоновано прогнозує релейно-векторне регулювання статорного струму для асинхронного електропривода з матричним безпосереднім перетворювачем частоти, для якого методом імітаційного моделювання проведено дослідження електромеханічних та електромагнітних процесів вказаного електропривода в статичних та динамічних режимах.*

**Ключові слова:** асинхронний електропривід, матричний безпосередній перетворювач частоти, прогнозує релейно-векторне керування, імітаційне моделювання.

Останні роки характеризуються широким використанням у промисловості активних статичних перетворювачів частоти (СПЧ), що призначені для створення частотно-регульованих електроприводів з підвищеною швидкодією регулювання та покращеною електромагнітною сумісністю з мережею. З погляду схемотехнічних рішень активні перетворювачі можна розділити на дві групи. Перша – це дволанкові перетворювачі частоти (ДПЧ), що складаються із двох автономних інверторів напруги (АІН) або двох автономних інверторів струму (АІС), один із яких працює в режимі випрямлення, а інший – в режимі інвертування. У проміжній ланці по-

стійного струму встановлюється для АІН – ємність, що згладжує, для АІС – реактор. Наявність громіздкого фільтра в проміжній ланці є одним з найбільш істотних недоліків схем ДПЧ. Однак сьогодні найбільший інтерес у світі та Україні викликає друга група перетворювачів – безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ), у структурі яких відсутній проміжний фільтр. Як наслідок, БПЧ має кращі масогабаритні та динамічні показники в порівнянні з активними ДПЧ, також забезпечує двосторонній обмін енергією з мережею живлення, має форму кривої вхідного та вихідного струмів, близьку до синусоїдальної і, як наслідок, високу швидкодію регу-