

УДК 621.311

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТА ДИСКРЕТИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик

Томский политехнический университет

E-mail: dzhumik@tpu.ru

*Представлены этапы процедур диагностирования элементов электроэнергетической системы. Для работы с массивами мгновенных значений токов и напряжений, полученных цифровыми регистраторами электрических сигналов, разработан специализированный математический аппарат – дискретизированная электротехника. Представлены основные правила и процедуры аппарата дискретизированной электротехники.*

### Введение

Для энергетики Российской Федерации актуален переход от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по действительному техническому состоянию электрооборудования. Для принятия правильных решений при диагностировании состояния электрооборудования необходимо иметь достаточно полную и достоверную информацию о контролируемых объектах – параметрах электрического режима (ПЭР) и параметрах схем замещения (ПСЗ). Сегодня в энергосистемах имеются разнообразные регистраторы электрических сигналов, используемые лишь для регистрации аварийных процессов, «запоминающие» те или иные массивы отсчетов контролируемых величин. В связи с этим вполне оправданы попытки более широкого применения при решении вышеперечисленных задач информации, заложенной в массивах мгновенных значений напряжений и токов различных элементов ЭЭС. Неоспоримым преимуществом при анализе электрических процессов в элементах ЭЭС и в энергосистеме в целом является тот факт, что в массивах мгновенных значений токов и напряжений представлена наиболее полная и точная информация о физических процессах в элементах ЭЭС.

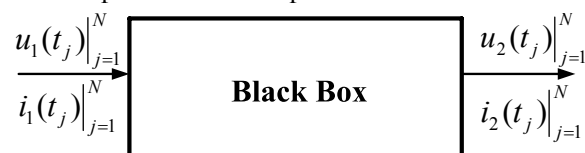
На практике, как правило, измеряют следующие параметры электрического режима: действующие значения токов и напряжений, вырабатываемую и потребляемую электроэнергию. Параметры схем замещения элементов электроэнергетических систем (ЭЭС) определяются из справочных или паспортных данных [1]. Однако очевидно, что информации о ПЭР по контролируемому объекту недостаточно для выяснения реального технического состояния электрооборудования. Также известно, что значения ПСЗ в процессе эксплуатации электрооборудования претерпевают значительные изменения и существенно зависят от множества факторов.

Ожидается, что сеть цифровых регистраторов электрических сигналов точно синхронизированных между собой во времени через каналы оптоволоконной связи, или выделенный диапазон ВЧ-связи, или системы точной синхронизации на основе GPS позволит в режиме реального времени получать информацию о текущем состоянии объекта [1]. Такая информация необходима для комплек-

сов оценивания состояния объекта, диагностики состояния электрооборудования, адаптивного управления контролируемым объектом. В основу адаптивного управления должна быть положена адаптивная модель объекта, построение которой осуществляется на основе текущей информации о режимных и схемных параметрах – ПСЗ, определяемых на основе значений ПЭР. Адаптивная модель элемента ЭЭС подразумевает получение информации, адекватной состоянию объекта управления. Это достигается непрерывным расчетом и сохранением текущих ПЭР и ПСЗ в базе данных.

В литературе, например [2], под техническим диагностированием понимают процесс определения технического состояния объекта диагностирования с заданной точностью. Возможна трехэтапная процедура диагностирования:

- I. Определяют параметры схемы замещения заведомо исправного объекта на основе вычислительной обработки массивов мгновенных значений токов  $i(t)$  и напряжений  $u(t)$  на «входе» и «выходе» объекта (рисунок) в рабочем режиме. В результате идентификации получают Г-, Т- и П-образную схемы замещения с параметрами (активными и реактивными сопротивлениями), несущими информацию об исправном объекте диагностирования («исправно»).
- II. Аналогично находят параметры схемы замещения объекта в момент его контроля.
- III. Проводят диагностирование путем сравнения и сопоставления результатов, полученных на первом и втором этапах, и ставят диагноз в виде «исправно» – «неисправно».



**Рисунок.** Получение измерений на «входе» и «выходе» объекта

В ЭЛТИ ТПУ на кафедрах «Электрические станции» и «Электроэнергетические системы и высоковольтная техника» ведутся НИР и ОКР, направленные на использование при диагностировании массивов мгновенных значений токов и напряже-

ний, полученных с помощью цифровых регистраторов электрических сигналов [3–6]. В настоящей статье рассмотрен вопрос разработки «удобного» математического аппарата, названного нами «дискретизированной электротехникой», оперирующего именно с массивами мгновенных значений токов и напряжений.

**Основные правила и процедуры дискретизированной электротехники**

В подавляющем числе случаев любые измерения электрических величин, в частности, тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$ , осуществляются с помощью цифровых методов измерений и реализующих их измерительных приборов и систем. Поэтому в общем случае будем исходить из предположения, что имеется два массива экспериментальных данных  $a(t_j)$  и  $b(t_j)$ , полученных в одни и те же моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_N$ , где  $t_2=t_1+\Delta t, \dots, t_j=t_{j-1}+\Delta t, \dots, t_N=t_{N-1}+\Delta t$  с шагом дискретизации  $\Delta t$  при общем числе отсчетов массива  $N$  и длине массива  $T_M$  (предполагаем, что длина массива равна или больше периода сигнала  $T$ ), т. е.  $T_M \geq T, N=T/\Delta t$ .

Ясно, что  $T$  и  $\Delta t$  должны быть кратны друг другу, чтобы число отсчетов  $N$  на периоде сигнала было целым.

Используем следующие виды записи основных правил дискретизированной электротехники:

$$a(t_j) \Big|_{j=1}^N = a(t_1), a(t_2), \dots, a(t_j), \dots, a(t_N);$$

$$b(t_j) \Big|_{j=1}^N = b(t_1), b(t_2), \dots, b(t_j), \dots, b(t_N);$$

$$\begin{aligned} [a(t_j) \cdot b(t_j)] \Big|_{j=1}^N &= \\ &= a(t_1) \cdot b(t_1), a(t_2) \cdot b(t_2), \dots, a(t_j) \cdot b(t_j), \dots, a(t_N) \cdot b(t_N); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a^2(t_j) \Big|_{j=1}^N &= \\ &= a(t_1) \cdot a(t_1), a(t_2) \cdot a(t_2), \dots, a(t_j) \cdot a(t_j), \dots, a(t_N) \cdot a(t_N); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [a(t_j) + b(t_j)] \Big|_{j=1}^N &= \\ &= a(t_1) + b(t_1), a(t_2) + b(t_2), \dots, a(t_j) + b(t_j), \dots, a(t_N) + b(t_N). \end{aligned}$$

В таблице приведены базовые формулы классической электротехники и аналогичные им формулы дискретизированной электротехники.

При известных мгновенных значениях сигналов  $a(t)$  и  $b(t)$  мгновенная мощность  $p_{ab}(t)$  определяется их произведением.

Активная мощность – среднее значение мгновенной мощности за период.

Полной мощностью принято называть произведение действующих значений напряжения и тока.

При «прямом» использовании массивов мгновенных значений напряжений и токов для определения параметров участка электрической цепи по закону Ома, как частного от деления  $u(t) \Big|_{j=1}^N$  на  $i(t) \Big|_{j=1}^N$ , может встретиться случай деления на ноль – при  $i(t)=0$ . Поэтому предлагаются «новые» формулы для определения  $R_k$  и  $X_k$ .

Дискретизированная электротехника принципиально отличается от классической электротехники:

- переходом к использованию решетчатых функций, как нельзя лучше соответствующих современности

**Таблица.** Формулы классической и дискретизированной электротехники

Наименование	Классическая электротехника	Дискретизированная электротехника
Действующее, эффективное значение сигнала	$A = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right]^{0,5}$	$A = \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a^2(t_j) \Big _{j=1}^N \right]^{0,5}$
Среднее значение сигнала	$A_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T  a(t)  dt$	$A_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N  a(t_j)  \Big _{j=1}^N$
Постоянная составляющая сигнала	$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} a(t) dt$	$A_0 = A_{cp}, \text{ при } T_M = T; N_M = N = \frac{T}{\Delta t}$
Мгновенная мощность сигналов $a(t)$ и $b(t)$	$P_{ab} = a(t) \cdot b(t)$	$P_{ab}(t_j) \Big _{j=1}^N = a(t_j) \Big _{j=1}^N \cdot b(t_j) \Big _{j=1}^N$
Активная мощность сигналов $a(t)$ и $b(t)$ при известном угле сдвига фаз $\varphi_{ab}$ между ними	$P_{ab} = A \cdot B \cdot \cos \varphi_{ab}$	$P_{ab} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_{ab}(t_j) \Big _{j=1}^N$
Полная мощность сигналов $a(t)$ и $b(t)$	$S_{ab} = A \cdot B$	$S_{ab} = U_a \cdot I_b = \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a^2(t_j) \Big _{j=1}^N \right]^{0,5} \cdot \left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N b^2(t_j) \Big _{j=1}^N \right]^{0,5}$
Первый закон Кирхгофа для мгновенных значений токов в узле электрической цепи с $q$ ветвями	$\sum_{k=1}^q i_k(t) = 0$	$\sum_{k=1}^q i_k(t_j) \Big _{j=1}^N = 0$
Второй закон Кирхгофа для мгновенных значений напряжений в контуре с $l$ ветвями	$\sum_{k=1}^l u_k(t) = 0$	$\sum_{k=1}^l u_k(t_j) \Big _{j=1}^N = 0$
Закона Ома для $k$ -го участка цепи	$Z_k = \frac{U_k}{I_k}$	$R_k = \frac{P_k}{I_k^2}; X_k = \frac{Q_k}{I_k^2}$

менным измерительным системам и приборам, использующим цифровые методы обработки и представления информации;

- введением в теорию и практику электротехнических расчетов цифровых процедур расчета реактивной мощности сдвига  $Q_c$  на основе развития идей М.А. Маевского по использованию вольтамперных характеристик для мгновенных значений тока и напряжения;
- новым прочтением классических работ Б.Д.Х. Теллеждена по квазиомощности и введением в оборот понятий об активной и реактивной квазиомощностях, что позволило получить ряд ранее неизвестных процедур определения угла сдвига фаз между сигналами, представленными цифровыми отсчетами мгновенных значений;
- широким использованием, наряду с процедурой расчета на основе закона Ома, процедур расчета параметров отдельных ветвей схемы замещения или по мощности и квадрату тока ветви или на основе решения разностного уравнения для цепи  $RL$  или  $RC$ .

Возможности аппарата дискретизированной электротехники позволяют определять параметры

и характеристики контролируемых цепей известной конфигурации [6].

#### Выводы

1. Для работы с массивами мгновенных значений токов и напряжений, полученных цифровыми регистраторами электрических сигналов, разработан специализированный математический аппарат – дискретизированная электротехника, что позволяет в рабочем режиме определять параметры электрических режимов и элементов электроэнергетических систем.
2. Описана предложенная авторами трехэтапная процедура диагностирования технического состояния объектов электроэнергетики РФ, позволяющая перейти от системы планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по действительному техническому состоянию электрооборудования.
3. Продемонстрирована работоспособность формул и процедур дискретизированной электротехники при определении параметров электрических режимов и параметров схем замещения элементов электроэнергетических систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердин А.С., Крючков П.А., Суворов А.А., Шелюг С.Н. Методы определения параметров схемы замещения для задач управления электрическими режимами // Проблемы развития и функционирования электроэнергетических систем: Сб. трудов / Отв. ред. П.И. Бартоломей. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С. 25–31.
2. Киншт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А. Диагностика электрических цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.: ил.
3. Джумик Д.В., Гольдштейн Е.И., Хрущев Ю.В. Использование массивов мгновенных значений токов и напряжений в задачах формирования адаптивных моделей электроэнергетических систем // Вестник УГТУ-УПИ. Проблемы управления электроэнергетикой в условиях конкурентного рынка: Сб. трудов / Отв. ред. П.И. Бартоломей. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ», 2005. – № 12 (64). – С. 316–321.

4. Гольдштейн Е.И. Вопросы дискретной электротехники в курсе «Технология решения инженерных задач» // Вестник УГТУ-УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция: Сб. докл. II Всеросс. научно-техн. конф. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2004. – № 12 (42). – С. 473–477.
5. Аврамчук В.С., Бацева Н.Л., Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н., Ли Д.В., Сулайманов А.О., Цапко И.В. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения / Под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
6. Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Джумик Д.В., Усов Ю.П. Диагностирование электротехнических цепей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 152 с.

Поступила 28.11.2006 г.