Официальный сайт ЗАО "ФЕНИКС-88"
fenix88.com

Дискретизированная электротехника в задачах расчета параметров схем замещения ЛЭП, реакторов, конденсаторных батарей и силовых резисторов

Е.И. Гольдштейн, Д.В. Джумик
Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел.: (3822) 564-657; факс: (3822) 563-763
E-mail: dzhumik@tpu.ru

1.1 Введение

В настоящее время в энергетике Российской Федерации имеет место 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). На практике, как правило, измеряют следующие параметры электрического режима: действующие значения токов и напряжений, вырабатываемую и потребляемую электроэнергию. Параметры схем замещения элементов 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.

Например, для воздушной ЛЭП: из-за влияния изменяющихся погодных условий на коронирование проводов ЛЭП и интенсивность их охлаждения; из-за наличия врезок из проводов других марок; неточности задания среднегеометрического расстояния между фазами при расчете удельного сопротивления; ошибок при определении длины линии (например, при наличии отпаек); влияния электрического режима линии и т.п. Для кабельной линии: из-за ошибок при определении длины кабельной линии; влияния электрического режима линии; из-за воздействия положительных и отрицательных температур; воздействия влаги; слабых растворов грунтовых щелочей и кислот; установки кабельных муфт при повреждении кабеля. Все вышеперечисленное влияет и приводит к необратимым изменениям электрических, а также механических параметров кабеля.

С другой стороны нельзя не учитывать, что сегодня в энергосистемах имеются разнообразные регистраторы электрических сигналов (РЭС), используемые лишь для регистрации аварийных процессов.

В ЭЛТИ ТПУ на кафедрах «Электрические станции» и «Электроэнергетические системы и высоковольтная техника» ряд лет ведутся НИР и ОКР, направленные:

- на получение ПЭР и ПСЗ по массивам мгновенных значений (ММЗ) токов и напряжений, полученных в рабочих режимах контролируемых объектов;
- проведение диагностирования контролируемых объектов путем сопоставления текущих ПЭР и ПСЗ с соответствующими параметрами, полученными на заведомо исправном (неаварийном) объекте.

При такой постановке вопроса встал вопрос о разработке «удобного» математического аппарата, названного нами «дискретизированной электротехникой» (ДЭ).

1.2 Основные правила и процедуры дискретизированной электротехники

Сегодня 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 предложения, 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

$$t_2 = t_1 + {}_\Delta t \; ; \dots \; t_j = t_{j-1} + {}_\Delta t \; ; \dots \; t_N = t_{N-1} + {}_\Delta t \qquad (1.1)$$

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), то есть

$$T_M \geq T \; , \qquad N = \frac{T}{{}_\Delta t} \; . \qquad (1.2)$$

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

Используем следующие виды записи (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

1) $a(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = a(t_1),\, a(t_2),\, \dots a(t_j),\, \dots a(t_N);$	(1.3)
2) $b(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = b(t_1),\, b(t_2),\, \dots b(t_j),\, \dots b(t_N);$	
3) $\left[a(t_j)\cdot b(t_j)\right]_{j=1}^{N} = a(t_1)\cdot b(t_1),\, a(t_2)\cdot b(t_2),\, \dots a(t_N)\cdot b(t_N);$	
4) $a^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = a(t_1)\cdot a(t_1),\, a(t_2)\cdot a(t_2),\, \dots a(t_N)\cdot a(t_N);$	

Окончание табл. 1.1

5) $\left[a(t_j)+b(t_j)\right]_{j=1}^{N} = a(t_1)+b(t_1);\ a(t_2)+b(t_2);\ \ldots a(t_N)+b(t_N);$	(1.3)
6) $\dot{a}(t_j) = \frac{d}{dt}a(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = \frac{a(t_{j+1})-a(t_{j-1})}{2\cdot\Delta t}\Big\|_{j=1}^{N};$	
7) $\dot{a}(t_j) = \frac{1}{12\cdot\Delta t}\left[\left(a(t_{j-2})-a(t_{j+2})\right)-8\left(a(t_{j-1})-a(t_{j+1})\right)\right]\Big\|_{j=1}^{N}.$	

В табл. 1.1 6) и 7) – формулы численного дифференцирования: явная трехточечная формула и формула дифференцирования после сглаживания.

В табл. 1.2 приведены базовые формулы традиционной электротехники и аналогичные им формулы дискретизированной электротехники.

Напомним, что мощность характеризует интенсивность энергетического процесса и измеряется количеством энергии в единицу времени.

При известных мгновенных значениях сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$ мгновенная мощность $p_{ab}(t_j)$ определяется как их произведение (см. табл. 1.2, формула (1.7)).

Активная мощность – среднее значение мгновенной мощности за период (см. табл. 1.2, формула (1.8)).

Полной мощностью принято называть произведение действующих значений напряжения и тока (см. табл. 1.2, формула (1.9)).

При «прямом» использовании массивов мгновенных значений (ММЗ) напряжений и токов для определения параметров определенного участка электрической цепи по закону Ома, как частного от деления $u(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$ на $i(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$, может встретиться случай деления при $i\ (t_j)=0$. Поэтому предлагаются «новые» формулы (1.12) для определения R_K и X_K.

Таблица 1.2

Действующее, эффективное значение сигнала	$A = \left[\frac{1}{T}\int_0^T a^2(t)dt\right]^{0,5}$	$A = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} a^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}$	(1.4)
Среднее значение сигнала	—	$A_{ср} = \frac{1}{N_M}\sum_{j=1}^{N} a^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$	(1.5)
Постоянная составляющая сигнала	—	$A_0 = A_{ср}$, при $T_M = T;\ \ N_M = N = \frac{T}{\Delta t}$	(1.6)
Мгновенная мощность сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$	$p_{ab} = a(t)\cdot b(t)$	$p_{ab}(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = a(t_j)\cdot b(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$	(1.7)
Активная мощность сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$ при известном угле сдвига фаз φ_{ab} между ними	$P_{ab} = A\cdot B\cdot\cos\varphi_{ab}$	$P_{ab} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} p_{ab}(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}$	(1.8)
Полная мощность сигналов $a(t_j)$ и $b(t_j)$	$S_{ab} = A\cdot B$	$S_{ab} = U_a\cdot I_b = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} a^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}\bullet\left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} b^2(t_j)\Big\|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}$	(1.9)

Окончание табл. 1.2

Первый закон Кирхгофа для мгновенных значений токов в узле электрической цепи с q ветвями	$\sum_{k=1}^{q} i_k(t) = 0$	$\sum_{k=1}^{q} i_k(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = 0$	(1.10)
Второй закон Кирхгофа для мгновенных значений напряжений в контуре с l ветвями	$\sum_{k=1}^{l} u_k(t) = 0$	$\sum_{k=1}^{l} u_k(t_j)\Big\|_{j=1}^{N} = 0$	(1.11)
Аналог закона Ома в дискретизированной электротехнике для k-го участка цепи	$Z_K = \frac{U_K}{I_K}$	$R_K = \frac{P_K}{I_K^2}; \quad X_K = \frac{Q_K}{I_K^2}$	(1.12)

1.3 Определение параметров схем замещения ЛЭП, резисторов, реакторов и конденсаторных батарей по ММЗ токов и напряжений

При определении параметров схем замещения элементов ЭЭС предложено использовать два подхода. В первом случае по мгновенным значениям токов и напряжений определяются соответствующие мощности и действующие значения токов, а по ним – параметры схемы замещения [4]. При использовании второго подхода параметры схем замещения находят по мгновенным значениям токов, напряжений, их производных посредством решения дифференциальных (разностных) уравнений.

При определении параметров схем замещения ЛЭП следует обратить внимание на то, что измеряют мгновенные значения сигналов напряжений и токов в начале и в конце линии и передают массивы с конца линии в ее начало по оптоволоконному, спутниковому или высокочастотному каналу связи (КС) (см. рисунок 1).

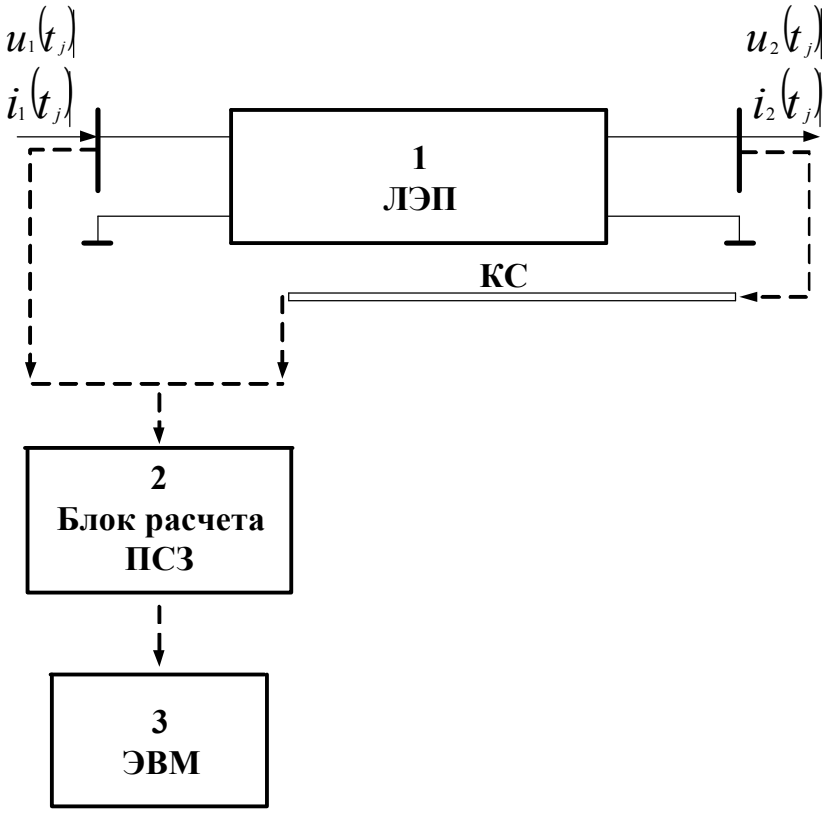


Рисунок 1 – Формирование ММЗ ЛЭП

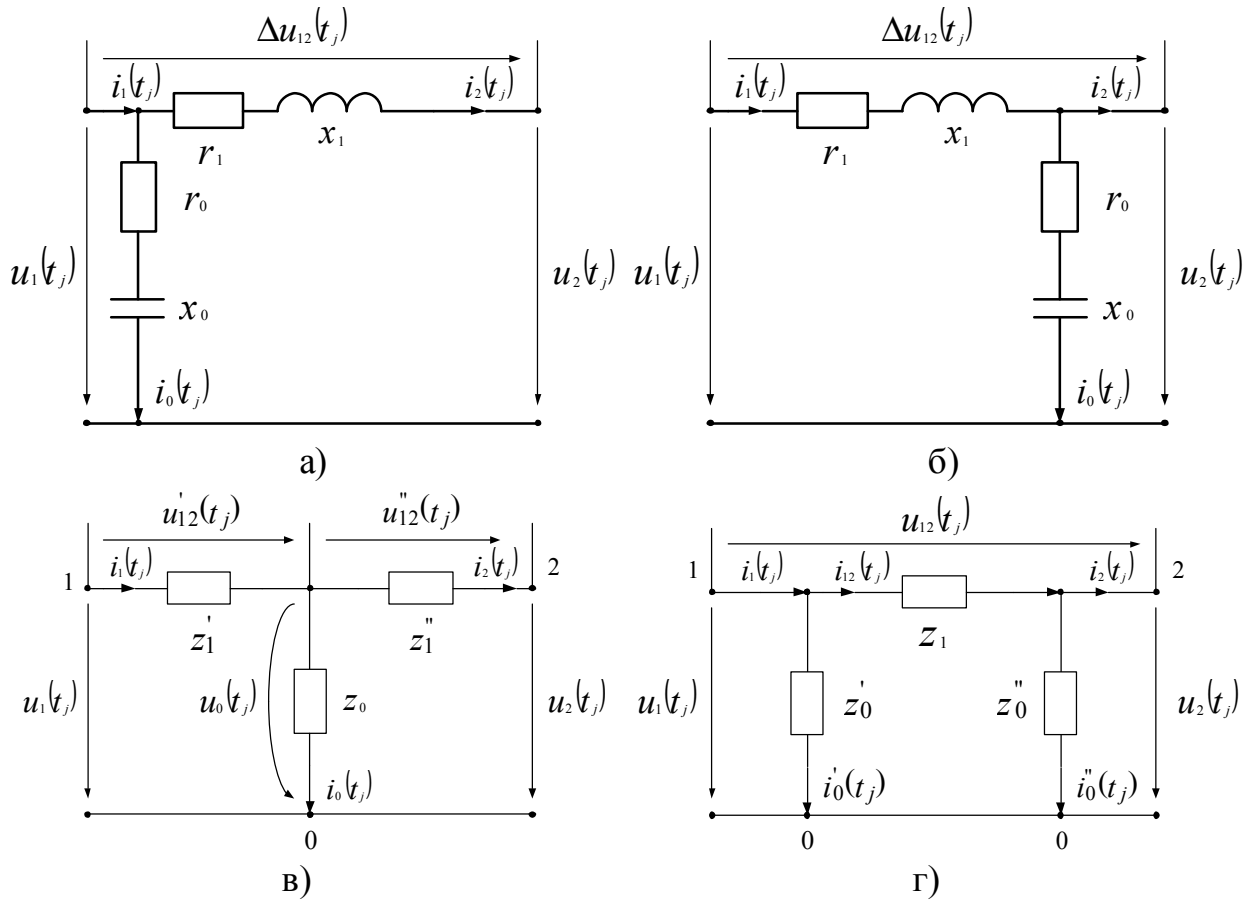
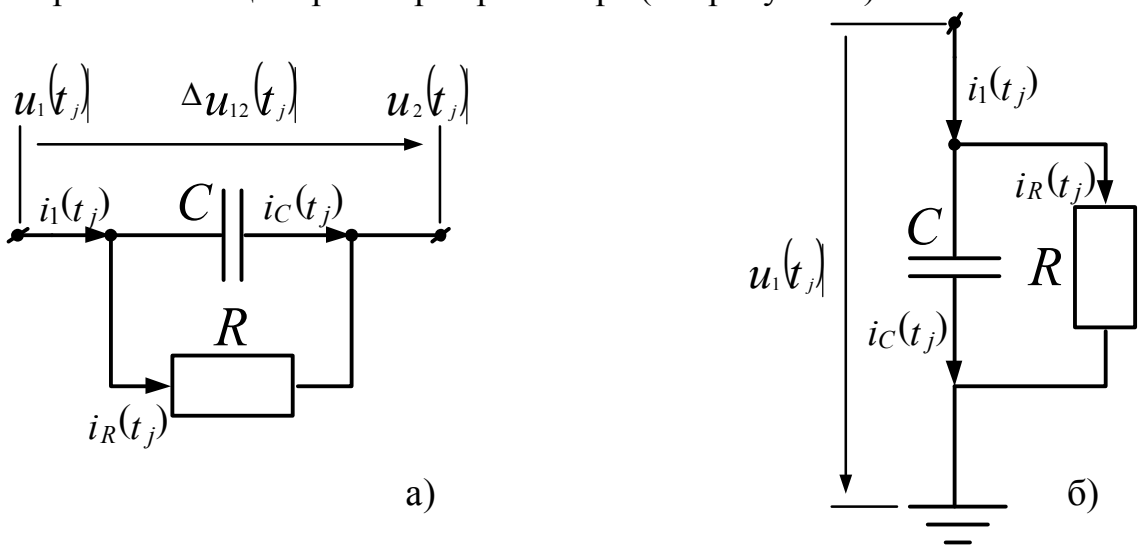


Рисунок 2 – Схема замещения линии электропередачи

Далее рассмотрим первый и второй подходы определения параметров элементов ЭЭС на примере линейного токоограничивающего реактора / резистора.

Первый способ определения параметров линейного токоограничивающего реактора / резистора (см. рисунок 3).



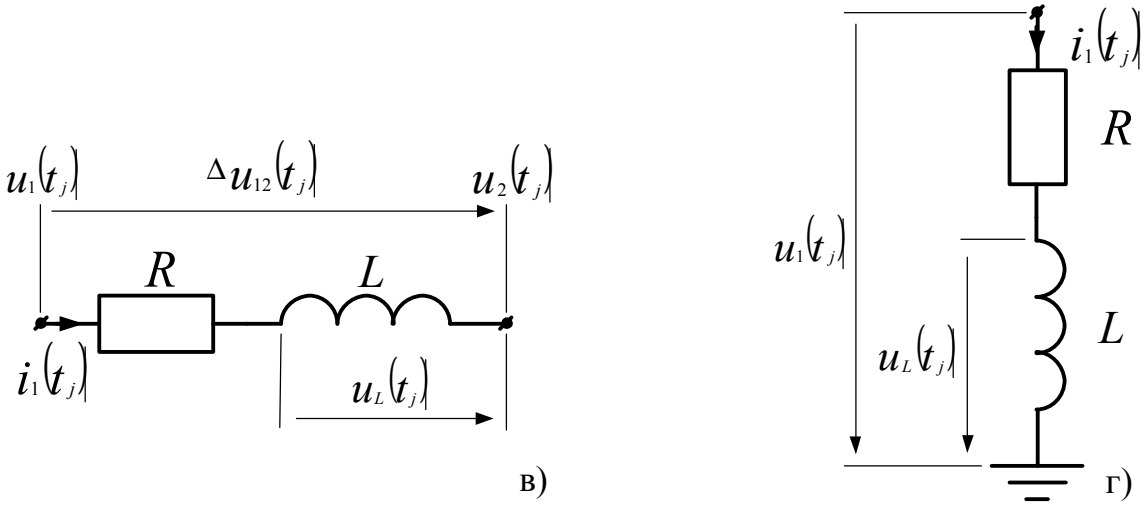


Рисунок 3 – Схема замещения конденсаторной батареи
и реактора / резистора:
а) продольное включение; б) поперечное включение

По массивам отсчетов мгновенных значений тока и напряжения $u_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N}$, $i_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N}$, $u_2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}$ реактора / резистора, полученным в одни и те же моменты времени $t_j = t_1, t_2, ..., t_N$, с шагом $\Delta t = \dfrac{T}{N}$, где T – период сигнала тока (напряжения), а N – число отсчетов на периоде, определяем падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения

$$\Delta u_{12}(t_j)\Big|_{j=1}^{N} = u_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N} - u_2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}.$$

Затем по соответствующим процедурам определяем действующее значение тока, активную и реактивную потери мощности:

$$I_1 = \left[\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} i_1^2(t_j)\Big|_{j=1}^{N}\right]^{0,5}, \qquad \Delta P_1 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\Delta u_{12}(t_j)\cdot i_1(t_j)\Big|_{j=1}^{N},$$

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{4\rho}\sum_{j=1}^{N}\left[\Delta u_{12}(t_j) - \Delta u_{12}(t_{j+1})\right]\cdot\left[i_1(t_j) + i_1(t_{j+1})\right]_{j=1}^{N}.$$

Далее находим активное и реактивное сопротивление линейного токоограничивающего реактора / резистора:

$$R = \frac{\Delta P_1}{I_1^2}, \qquad X = \frac{\Delta Q_1}{I_1^2}.$$

Рассмотрим второй способ определения параметров линейного токоограничивающего реактора / резистора. По массивам отсчетов мгновенных значений тока и напряжения реактора / резистора, определяем падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения, которое включает падения напряжения на активном сопротивлении и индуктивности линейного токоограничивающего реактора / резистора:

$$U_R(t_j) = R \cdot i_1(t_j); \qquad U_L(t_j) = L \cdot i_1^{'}(t_j).$$

Следует отметить то, что невозможно «напрямую» определить эти составляющие падения напряжения. Кроме того, при решении данной задачи возникла проблема определения производной тока. Сравнительный анализ пятиточечной и трехточечной формул дифференцирования после сглаживания [5] показал несомненные преимущества первой из формул. Именно она была использована в процедурах определения напряжения на индуктивности и расчетной производной $i_P^{'}(t_j)$:

$$U_L(t_j) = \Delta U_{12}(t_{j+1}) - \frac{\Delta U_{12}(t_j) \cdot i_1(t_{j+1})}{i_1(t_j)};$$

$$i_1^{'}(t_{j+1}) = \frac{1}{12 \cdot \Delta t}\left[\left(i_1(t_{j-1}) - i_1(t_{j+3})\right) - 8\left(i_1(t_j) - i_1(t_{j+2})\right)\right];$$

$$i_1^{'}(t_j) = \frac{1}{12 \cdot \Delta t}\left[\left(i_1(t_{j-2}) - i_1(t_{j+2})\right) - 8\left(i_1(t_{j-1}) - i_1(t_{j+1})\right)\right];$$

$$i_P^{'}(t_j) = i_1^{'}(t_{j+1}) - \frac{i_1^{'}(t_j) \cdot i_1(t_{j+1})}{i_1(t_j)}.$$

Затем находим индуктивность и активное сопротивление реактора / резистора:

$$L_i = \frac{U_L(t_j)}{i_P^{'}(t_j)}; \qquad R_i = \frac{\Delta U_{12}(t_j) - i_1^{'}(t_j) \cdot L_i}{i_1(t_j)}.$$

В таблице 1.3 представлены результаты расчетов значений параметров токоограничивающего реактора РБ-10-400-0,35У3 и силового резистора ШС-300.

Для сравнения в таблице 1.4 приведены паспортные данные этих элементов.

Из таблицы 1.3 видно, что параметры линейного токоограничивающего реактора / резистора, полученные с помощью предлагаемых способов, являются близкими к их паспортным значениям.

Таблица 1.3

Способ определения параметров	Элемент электрической цепи	N	R, Ом	X, Ом	Относительная погрешность вычисления ε, %	
					R	X
1. По мощностям	Токоограничивающий реактор РБ-10-400-0,35У3	64	0,01	0,349439	0	0,16
	Резистор ШС-300		150,0002	0,376391	0,0001	0,162
2. По дифференциальным (разностным) уравнениям	Токоограничивающий реактор РБ-10-400-0,35У3	64	0,01	0,35	0	0
	Резистор ШС-300		150,0002	0,377	0,0001	0

Таблица 1.4

Элемент электрической цепи	Паспортные данные				
	$U_{ном}$, кВ	$I_{ном}$, А	$S_{ном}$, МВа	$R_{пасп}$, Ом	$X_{пасп}$, Ом
Токоограничивающий реактор РБ-10-400-0,35У3	10	400	6,9	0,01	0,35
Резистор ШС-300	47,5	183	8,7	150	0,377

Аналогичные процедуры могут быть также использованы при определении параметров схем замещения конденсаторных батарей и линий электропередачи.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на ряде конференций и семинаров [4, 6-9], по ним уже получены патенты на изобретения и полезные модели [№2282201, №49278, №51752, №57016, №2289823, №59837]. В «Роспатенте» находятся на рассмотрении еще ряд заявок.

Заключение: Таким образом, диагностирование электроустановок можно проводить по параметрам их схем замещения, без вывода из эксплуатации, на месте их установки. Кроме того, нет необходимости в покупке дополнительного программного обеспечения для регистратора и нет необходимости в замене диагностируемой электроустановки аналогичной на время проведения диагностики. Предполагается, что на основе анализа ММЗ токов и напряжений в рабочем режиме будет производиться сравнение параметров схем замещения в заведомо исправном режиме и в момент проведения контроля, что позволит сделать те или иные диагностические выводы.

Литература

1. А. С. Бердин, П. А. Крючков, А. А. Суворов, С. Н. Шелюг. Методы определения параметров схемы замещения для задач управления электрическими режимами // П 78 Проблемы развития и функционирования электроэнергетических систем: Сборник трудов / Отв. ред. П.И. Бартоломей. Екатеринбург: УГТУ, 2000. – с. 25-31.
2. Е.И. Гольдштейн. Вопросы дискретной электротехники в курсе «Технология решения инженерных задач» // В 38 Вестник УГТУ–УПИ. Энергосистема: управление, качество, конкуренция: Сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. № 12 (42). – с. 473-477.
3. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения / В.С. Аврамчук, Н.Л. Бацева, Е.И. Гольдштейн, И.Н. Исаченко, Д.В. Ли, А.О. Сулайманов, И.В. Цапко // Под ред. Е.И. Гольдштейна. Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
4. Д.В. Джумик, Е.И. Гольдштейн, Ю.В. Хрущев. Использование массивов мгновенных значений токов и напряжений в задачах формирования адаптивных моделей электроэнергетических систем // В 38 Вестник УГТУ-УПИ. Проблемы управления электроэнергетикой в условиях конкурентного рынка: Сборник трудов / отв. ред. П.И. Бартоломей. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ», 2005. № 12 (64) – с. 316-321.
5. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров.– М.: Наука, 1978. – 832 с.

6. Джумик Д.В. Определение текущих параметров электрического режима линии электропередачи для построения ее адаптивной модели // 11-ая Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 29 марта - 2 апреля 2005 г. Труды в 2-х т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т.1. – с. 82-84.
7. Д.В. Джумик. Использование аппарата дискретизированной электротехники при определении текущих параметров схем замещения линии электропередачи // Физико-математическое моделирование систем: Материалы II Междунар. семинара. Ч. 2: Моделирование технических систем. Математическое и программное обеспечение систем компьютерного моделирования. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – с. 17-22.
8. Dzhumik D.V. The determination current parameters electric mode to transmission line for building its T-form adaptive model // The twelfth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists «Modern Techniques and Technologies» (MTT'2006), Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2006. – p. 12-15.
9. Е.И. Гольдштейн, Ю.В. Хрущев, Н.Л. Бацева, Д.В. Джумик, И.М. Кац, А.В. Панкратов, Е. Радаев, А.О. Сулайманов. Функциональный контроль и диагностирование электроэнергетических систем и их элементов // Системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: Материалы Международного научно-технического семинара. – Томск: Томский политехнический университет, 2006. – с. 98-108.

Официальный сайт ЗАО "ФЕНИКС-88"
fenix88.com