

ДОВГАЛЮК О.Н., канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С КОНТРОЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Побудовано математичну модель автоматизованої системи обліку електричної енергії, що дозволяє прогнозувати значення параметрів режиму та здійснювати контроль показників якості в системі електропостачання. Застосування отриманої моделі дозволить оптимізувати функціонування автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем.

Построена математическая модель автоматизированной системы учета электрической энергии, позволяющая прогнозировать значения параметров режима и осуществлять контроль показателей качества в системе электроснабжения. Применение полученной модели позволит оптимизировать функционирование автоматизированных информационно-измерительных систем.

A mathematical model of an automated accounting system of electrical energy, which allows to predict the value of operation parameters and to monitor of electric energy quality for power supply system. Application of the resulting model will optimize the operation of automated information-measuring systems.

Современные автоматизированные системы учета электрической энергии (АСУЭ) представляют собой комплекс технических и программных средств, предназначенных для организации автоматического учета электроэнергии и автоматизированного управления процессом электропотребления.

Применение АСУЭ позволяет получать полную и оперативную информацию о расходах электроэнергии и мощности, что является основой для внедрения энергосберегающих технологий. При проектировании и эксплуатации АСУЭ возникает ряд задач, из которых одной из наиболее сложных и важных является моделирование таких систем. Решение этой задачи, позволяющее прогнозировать состояние объектов энергетики и результаты предлагаемых энергосберегающих технологий, является актуальным и необходимым для усовершенствования и оптимизации функционирования АСУЭ.

Исследованию особенностей проектирования и работы АСУЭ посвящены многие работы таких ученых как Праховник А.В., Калинин В.П., Тесик Ю.Ф., Васильченко В.И., Лежнюк П.Д., Черемисин Н.М., Титов Н.Н., Ожегов А.Н., Гельман Г.А. и др. [1-6]. В то же время вопросу моделирования данных систем не уделялось достаточно внимания.

Целью проведенных исследований является построение математической модели АСУЭ, которая позволит прогнозировать значения параметров режима сети и оценивать показатели качества электрической энергии (ПКЭ) в контролируемых точках сети.

Современные АСУЭ имеют многоуровневую распределенную структуру, в состав таких систем входит большое количество элементов и узлов. В общем случае в структуре АСУЭ можно выделить четыре уровня [1]:

- первый уровень - первичные измерительные приборы (ПИП) с телеметрическими или цифровыми выходами, осуществляющие непрерывно или с минимальным интервалом усреднения измерение параметров режима в контролируемых точках сети;
- второй уровень - устройства сбора и подготовки данных (УСПД), специализированные измерительные системы или многофункциональные программируемые преобразователи со встроенным программным обеспечением учета контролируемых параметров, осуществляющие в заданном цикле интервала усреднения круглосуточный сбор измерительных данных с территориально распределенных ПИП, накопление, обработку и передачу этих данных на верхние уровни АСУЭ;
- третий уровень - персональный компьютер (ПК) или сервер центра сбора и обработки данных (ЦСОД) со специализированным программным обеспечением АСУЭ, осуществляющий сбор информации с одного или группы УСПД, итоговую обработку этой информации как по точкам учета, так и по их группам, документирование и отображение данных учета в виде, удобном для анализа и принятия решений;
- четвертый уровень - сервер центра сбора и обработки данных со специализированным программным обеспечением АСУЭ, осуществляющий сбор информации с ПК или группы серверов ЦСОД третьего уровня, дополнительное агрегирование и структурирование информации по группам объектов учета, документирование и отображение данных учета в виде, удобном для анализа и принятия решений.

С технологической точки зрения АСУЭ имеет три уровня (рис. 1):

1. центральный уровень - АСУЭ главного оператора оптового рынка электроэнергии;
2. региональный уровень - АСУЭ субъектов энергорынка - операторов системы коммерческого учета энергогенерирующих, передающих и энергоснабжающих компаний;
3. локальный уровень - АСУЭ подстанций.

Все эти особенности делают АСУЭ достаточно сложным объектом моделирования [7], основные функции которого сводятся к следующим:

- контроль параметров режима в заданных точках системы электроснабжения (СЭС);

- анализ электропотребления и управление процессом распределения электрической энергии;
- контроль ПКЭ;
- оперативное отображение информации об аварийных и нештатных событиях, срабатывании блокировок и защит;
- ведение архива информации о работе оборудования и режимных параметрах СЭС.

$$\begin{cases} P_{вх} = P_p(t), \\ P_{вн} = P_{ac}(t), \\ P_{вых} = P_{kc}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $P_p(t)$ – матрица значений параметров режима для контролируемых точек сети, т.е. значений тока $I(t)$, напряжения $U(t)$ и мощности $S(t)$; $P_{ac}(t)$ – матрица передаточных функций структурных узлов АСУЭ $W(s)$ и значений погрешностей $\sigma_0(t)$, определяющих точность измерений; $P_{kc}(t)$ – матрица значений показателей качества работы АСУЭ $J(t)$, а также формируемых управляющих воздействий $v(t)$.

Случайный процесс $x(t)$ моделирует состояние СЭС. Непосредственному наблюдению данный процесс недоступен, в то же время существует возможность измерения другого процесса $y(t)$, несущего информацию о состоянии системы $x(t)$. По результатам наблюдений за процессом $y(t)$ на отрезке времени $[t_0, T]$, где $T > t_0$, необходимо построить оптимальную оценку $m(\tau)$ вектора $x(\tau)$. Поскольку соотношение времени для этого процесса можно выразить $\tau = T$, то данная задача классифицируется как фильтрация. При этом

$$x(t) \in R_n, \quad y(t) \in R_m, \quad (2)$$

где R_n, R_m – области допустимых значений параметров СЭС и наблюдений за ними.

Схема управления процессом контроля для АСУЭ представлена на рис. 3.

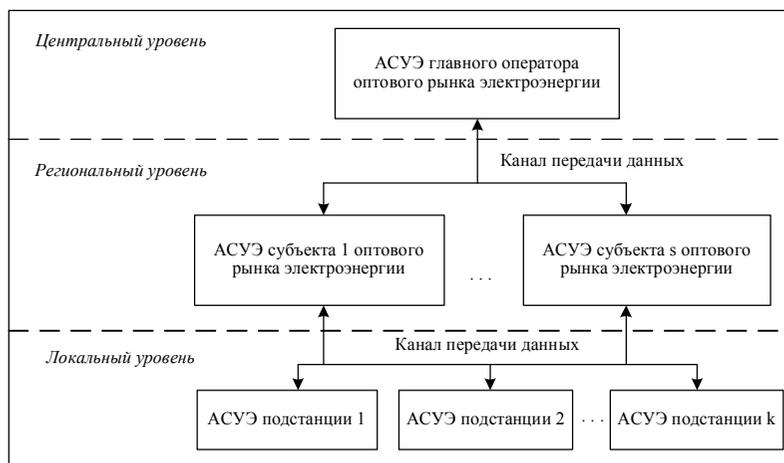


Рис. 1 – Структурная схема АСУЭ

Параметры АСУЭ, представленные на рис. 2., можно разделить на входные $P_{вх}$, внутренние $P_{вн}$ и выходные $P_{вых}$.

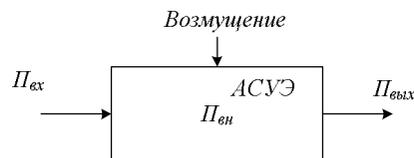


Рис. 2 – Параметры АСУЭ

К входным параметрам относятся параметры режима электрической сети и возмущающее воздействие, оказываемое на систему из внешней среды. К внутренним относятся параметры структурных элементов системы, а к выходным параметрам – показатели качества работы АСУЭ, по которым можно судить о правильности функционирования системы и сравнивать однотипные по назначению системы:

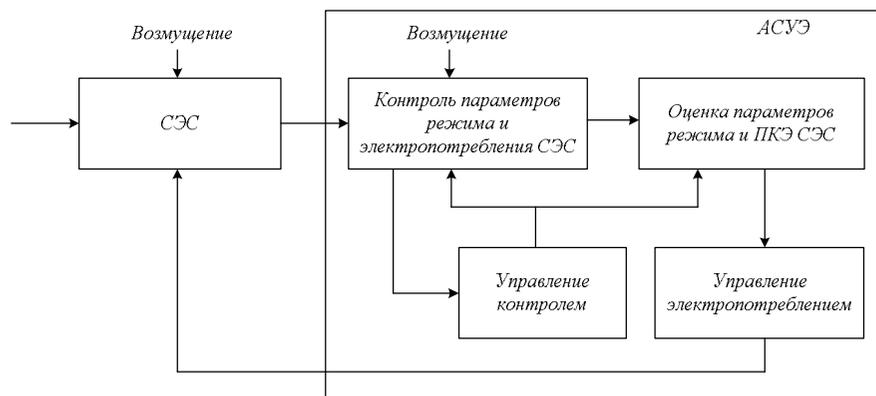


Рис. 3 – Схема управления процессом контроля для АСУЭ

Состояние СЭС и процесс контроля описываются системой линейных стохастических уравнений [8], имеющих вид

$$dx(t) = P_c(t)x(t)dt + \sigma(t)d\xi(t), \quad x(0) = x_0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (3)$$

$$dy(t) = P_{np}(t)x(t)dt + \sigma_0(t)d\xi_0(t), \quad y(0) = y_0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (4)$$

где $x(t)$ – параметры СЭС; $y(t)$ – контроль за параметрами СЭС; $P_c(t)$ – матрица параметров СЭС (сопротивлений и проводимостей элементов СЭС, определяемых конфигурацией системы и особенностями ее отдельных элементов); $P_{np}(t)$ – матрица состава измерений, т.е. значений контролируемых параметров режима СЭС (значений тока $I_n(t)$, напряжения $U_n(t)$ и мощности $S_n(t)$); $\xi(t)$, $\xi_0(t)$ – векторы, моделирующие помехи в СЭС и в канале измерения АСУЭ соответственно; $\sigma(t)$, $\sigma_0(t)$ – матрицы погрешностей СЭС и АСУЭ, определяющие точность измерений.

Матрицы $P_c(t)$, $\sigma(t)$, $P_{np}(t)$, $\sigma_0(t)$ определены и имеют измеримые ограниченные элементы. Согласно [9] ξ и ξ_0 представляют собой винеровские стандартные процессы, x_0 – гауссовский вектор, $Mx_0 = m_0$, $Dx_0 = D_0$. Случайные величины x_0 , ξ и ξ_0 взаимно независимы. При этом точность определения параметров режима системы характеризуется матрицей $D(t)$, а управление контролем – матрицей $v = P'_{np}(\sigma_0\sigma'_0)^{-1}P_{np}$, которые связаны уравнением фильтра Калмана:

$$\begin{aligned} \dot{D}(t) &= P_c(t)D(t) + D(t)P'_c(t) - D(t)v(t)D(t) + \sigma(t)\sigma'(t), \\ D(0) &= D_0, \quad v = P'_{np}(\sigma_0\sigma'_0)^{-1}P_{np}, \quad 0 \leq t \leq T. \end{aligned} \quad (5)$$

Задача фильтрации состоит в определении наилучшей в среднеквадратическом смысле оценки вектора $x(T)$ по результатам наблюдений y_T процесса (4) на отрезке времени $[0, T]$. В этом случае математическое ожидание $m(T)$ и матрица ковариации $D(T)$ вектора $x(T)$ при условии y_T определяются по выражениям:

$$m(T) = \frac{Mx(T)}{y_T}, \quad (6)$$

$$D(T) = \frac{M(x(T) - m(T))(x(T) - m(T))'}{y_T}. \quad (7)$$

Оценка значений ПКЭ производится согласно [10] с учетом полученной оценки параметров режима СЭС для момента времени T и формируется в виде матрицы $P_\kappa(T)$.

Критерий качества процесса контроля параметров режима и электропотребления СЭС согласно [8] имеет вид

$$J = q'D(T)q. \quad (8)$$

где $D(T)$ – дисперсия величины $q'x(T)$; q – заданный вектор из области R_n .

Для оценки достоверности полученной модели АСУЭ были проведены экспериментальные исследования в СЭС, результаты которых показаны на рис. 4 - 8.

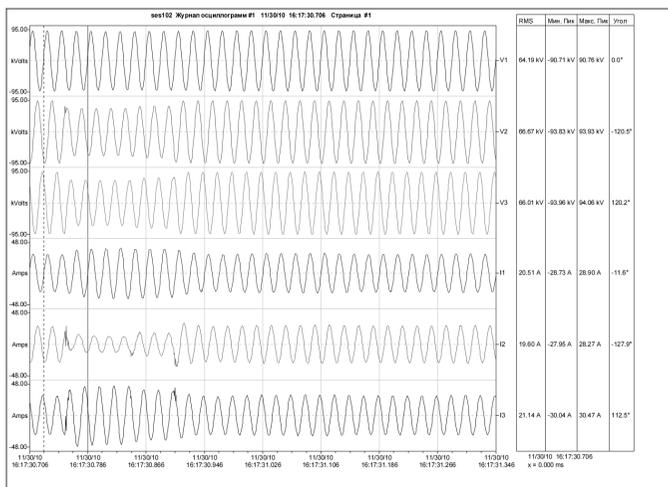


Рис. 4 – Значения параметров режима, полученные экспериментальным путем



Рис. 6 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения по фазам

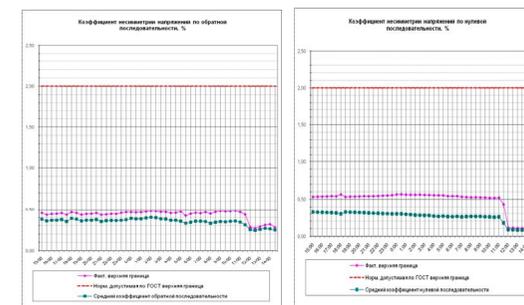
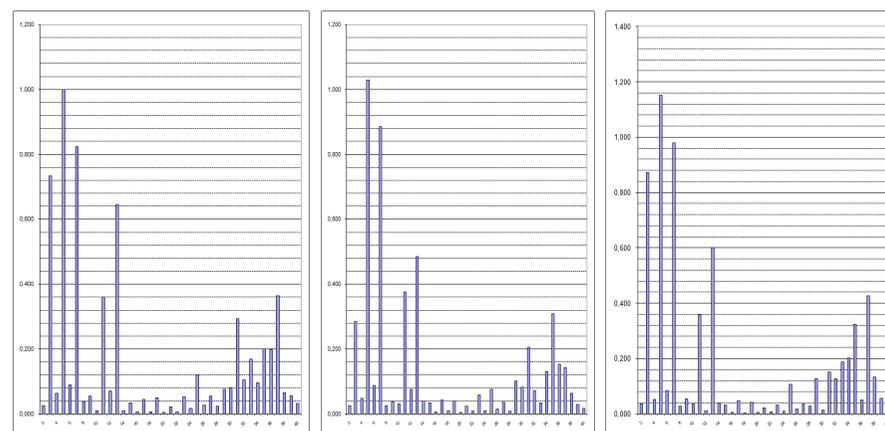


Рис. 7 – Коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям



а) б) в)

Рис. 5 – Среднее значение установившегося отклонения напряжения:
а – для фазы «А»; б– для фазы «В»; в– для фазы «С»



а) б) в)

Рис. 8 – Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения:
а– для фазы «А»; б– для фазы «В»; в– для фазы «С»

Для сравнения экспериментальных данных со значениями параметров режима и электропотребления СЭС, полученных с помощью построенной модели, определены погрешности расчета данных величин, значения которых представлены в таблице. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о достоверности моделирования АСУЭ с контролем ПКЭ.

Таблица – Значения погрешности контроля параметров режима, ПКЭ и электропотребления СЭС

Уровень АСУЭ	Количество замеров	Диапазон изменения значений погрешности		
		контроля параметров режима $\Delta_{\text{пр min}} \div \Delta_{\text{пр max}}, \%$	контроля ПКЭ $\Delta_{\text{ПКЭ min}} \div \Delta_{\text{ПКЭ max}}, \%$	контроля электропотребления $\Delta_{\text{эл min}} \div \Delta_{\text{эл max}}, \%$
1	более 70	0,01 ÷ 2,4	0,01 ÷ 2,5	0,02 ÷ 2,5
2	более 50	0,01 ÷ 2	0,01 ÷ 2,2	0,02 ÷ 2,5
3	более 30	0,005 ÷ 1,5	0,005 ÷ 1,8	0,01 ÷ 2,2
4	более 20	0 ÷ 1,5	0 ÷ 1,5	0,01 ÷ 2

Таким образом, полученная модель АСУЭ позволяет с требуемой точностью прогнозировать значения параметров режима, ПКЭ и электропотребления СЭС, что является дальнейшим развитием математического моделирования автоматизированных информационно-управляющих систем.

Применение полученной модели АСУЭ в дальнейшем позволит оптимизировать процесс контроля параметров и управления режимами СЭС.

Список литературы: 1. *Ожегов А.Н.* Системы АСКУЭ: Учебное пособие / *А.Н. Ожегов.* - Киров: Изд-во ВятГУ, 2006, - 102 с. 2. *Праховник А.В.* Автоматизация управления энергопотреблением / *А.В. Праховник.* - Киев: Вища шк., 1986. - 72 с. 3. *Праховник А.В.* Проблемы, препятствия и пути создания автоматизированных систем контроля и учета электрической энергии / *А.В. Праховник, В.П. Калинин, В.И. Прокопец* // Новини енергетики. - № 5. - 2007. - С. 51-55. 4. Стандарты для створення інтегрованих систем управління електроенергетичними компаніями / *А.В. Гінайло, І.М. Блощаневич, К.В. Уцяповський, П.О. Сергієнко, В.І. Васильченко, В.М. Людмирський, О.В. Сухомлінов.* - Київ, НЕК «Укренерго», 2007. - 14 с. 5. *Черемисин М.М.* Автоматизация объектов управления электроснабжения / *М.М. Черемисин, В.М. Зубко.* - Харьков: «Факт», 2005. - 192 с. 6. *Гельман Г.А.* Автоматизированные системы управления энергоснабжением промышленных предприятий / *Г.А. Гельман.* - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 256 с. 7. *Емельянов В.Ю.* Методы моделирования стохастических систем управления: Учебное пособие / *В.Ю. Емельянов.* - СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2004. -168 с. 8. *Афанасьев В.Н.* Математическая теория конструирования систем управления: Учеб. для вузов / *В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов.* - 2-е изд., доп. - М.: Высш. шк., 1998. - 574 с. 9. *Прохоров С.А.* Математическое описание и моделирование случайных процессов / *С.А. Прохоров.* - Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. - 209 с. 10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Взамен ГОСТ 13109-87; введ. 01.01.2000 - К.: Изд-во стандартов, 1999. - 31 с.

Поступила в редколлегию 20.02.2012