

УДК 621.313

Н.В. Богач, Ю.Б. Гимпилевич, С.Р. Зиборов, И.Б. Широков

*Севастопольский национальный технический университет
Студгородок, Стрелецкая балка, г. Севастополь, Украина, 99053*

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Описана работа измерительного комплекса, предназначенного для мониторинга теплового режима мощных электрических машин. Рассмотрены алгоритмы работы микропроцессорных устройств комплекса. Определены частота дискретизации измеряемых параметров и требуемый объем памяти комплекса. Приведены результаты суточного мониторинга силового трансформатора. Указаны области применения измерительного комплекса.

В процессе эксплуатации мощных электрических машин возможен перегрев отдельных узлов или элементов машин, за которым следует выход машины из строя. Причинами такого перегрева могут быть: переходные процессы, временная деградация, нарушения в работе системы охлаждения и т.п. В этой связи возникает проблема прогнозирования аварийных ситуаций и защиты от них, поскольку ремонт или замена мощных электрических машин связаны с большими финансовыми и временными затратами [1]. Контроль теплового режима машины можно осуществить путем микропроцессорного моделирования теплового состояния элементов конструкции машины в реальном масштабе времени. Однако для обеспечения заданной погрешности моделирования необходимо знать тепловые параметры машины (тепловые постоянные времени, теплоемкость частей конструкции машины, номинальные тепловые потери и пр.). Определение тепловых параметров требует измерения текущих значений средних квадратов фазных токов и напряжений, а также температур в заданных точках машины.

Для решения поставленной задачи был разработан измерительный комплекс, который обеспечивает следующее:

- измерение температуры с интервалом 5 минут в заданных 16 точках, а также средних значений квадратов фазных напряжений и токов с относительной погрешностью не более $\delta = \pm 1\%$;
- контроль настройки и текущих результатов мониторинга;
- накопление результатов мониторинга в течение 10 суток;
- возможность считывания накопленных данных в персональный компьютер (ПК).

Поскольку при эксплуатации электрических машин фазная нагрузка носит, как правило, активно-индуктивный характер, то апериодическая составляющая фазного тока имеет вид

$$i_a = \sum_{k=1}^M I_{mk} \cos(\psi_k - \varphi_k) e^{-\frac{t-t_k}{\tau_k}} 1(t-t_k) - \sum_{n=1}^N I_{mn} \cos \psi_n e^{-\frac{t-t_n}{\tau_n}} 1(t-t_n), \quad (1)$$

где $k=1, 2, \dots, M$ – номер включаемой нагрузки; $n=1, 2, \dots, N$ – номер отключаемой нагрузки; I_{mk} и I_{mn} – амплитуды периодических составляющих токов k -ой включаемой нагрузки и n -й отключаемой нагрузки соответственно; $\omega_c = 2\pi f_c$ – частота промышленной сети; t_k, t_n – моменты включения k -ой нагрузки и отключения n -ой нагрузки соответственно; ψ_k – фаза напряжения в момент включения k -ой нагрузки; ψ_n – фаза тока n -ой нагрузки в момент её отключения; φ_k – аргумент полного сопротивления k -ой нагрузки; τ_k, τ_n – постоянные времени k -ой и n -ой аperiodических составляющих тока; $1(t-t_k), 1(t-t_n)$ – единичные ступенчатые функция.

Оценим значение постоянной времени активно-индуктивной нагрузки:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_c} \operatorname{tg}[\arccos(\cos \varphi)] = \frac{1}{2\pi 50} \operatorname{tg}[\arccos 0,8] \approx 2,5 \text{ мс}, \quad (2)$$

где $\cos \varphi = 0,8$ – среднее значение коэффициента мощности промышленной сети [2].

Из (1) следует, что аperiodические составляющие фазного тока представляет собой экспоненциальные импульсы, модуль спектральной плотности которых равен [2]

$$S_i(\omega) = \frac{I_{m,i} \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}}, \quad (3)$$

где $I_{m,i}$ – амплитуда импульса тока, вызванного i -м переходным процессом.

С учётом (3) эффективная ширина энергетического спектра аperiodической составляющей фазного тока [2]

$$f_{zp} = \frac{\operatorname{tg}(\gamma \pi / 2)}{2\pi \tau} = \frac{\operatorname{tg}(0,9\pi / 2)}{2\pi \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 400 \text{ Гц},$$

где $\gamma = 0,9$ – относительный уровень, на котором производится отсчет эффективной полосы пропускания.

Поскольку возведение в квадрат сигнала вызывает удвоение ширины его спектра, то максимальная частота в спектре сигнала на выходе квадратора $f_{\max} = 2f_{zp} = 800 \text{ Гц}$.

Тогда в соответствии с теоремой Котельникова частота f_δ и интервал T_δ дискретизации сигнала при его аналого-цифровом преобразовании составят $f_\delta = 2f_{\max} = 1600 \text{ Гц}$ и $T_\delta = 1/f_\delta = 600 \text{ мкс}$.

Если пренебречь временем, необходимым для регистрации значений температуры, то время, выделяемое цифровому устройству для вычисления среднего значения квадрата каждого из фазных напряжений и токов, не превышает

$$T_{\theta} = \frac{T_{\partial}}{6} = \frac{600}{6} = 100 \text{ мкс.}$$

Число усредняемых выборок равно

$$N_{\theta} = \frac{T_{cp}}{T_{\partial}} = \frac{5 \cdot 60}{6 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^5.$$

где $T_{cp} = 5$ мин – время осреднения.

Функциональная схема измерительного комплекса изображена на рисунке 1.

На входы блока первичного преобразования БПП подают фазные напряжения U_A, U_B, U_C , а также выходные напряжения U_{IA}, U_{IB}, U_{IC} датчиков фазных токов, установленных на фазных шинах контролируемой электрической машины. Напряжения $U_A, U_B, U_C, U_{IA}, U_{IB}, U_{IC}$ через делители напряжения ДН1...ДН6 и схемы защиты СЗ1...СЗ6 поступают в блок вторичной обработки (БВО).

Каждый из датчиков температуры ДТ1...ДТ16 имеет индивидуальный 64-разрядный адресный код. Датчик вырабатывает цифровой код, пропорциональный значению температуры в точке его установки, и хранит этот код во внутреннем запоминающем устройстве. Обмен информацией между датчиком и БВО осуществляется в последовательном виде через двухпроводную шину и изолирующий двунаправленный цифровой соединитель (ЦС), которые являются общими для всех датчиков. При поступлении на шину из БВО адресного кода датчика последний выдает на эту шину код температуры.

Каналы К1, К3, К5 предназначены для измерения фазных напряжений. Каналы К2, К4, К6 предназначены для измерения фазных токов. Канал К7 предназначен для измерения температуры. Каналы К3, К5 построены аналогично каналу К1, а каналы К4, К6 - аналогично каналу К2 соответственно.

Нормирующие усилители НУ1, НУ2 осуществляют предварительное усиление сигналов U_A и U_{IA} .

Изолирующие усилители ИУ1, ИУ2 и преобразователи постоянного напряжения в постоянное ПН1, ПН2, с целью электробезопасности обеспечивают гальваническую развязку по цепям сигнала и питания соответственно. Фильтры нижних частот ФНЧ1, ФНЧ2 и ФНЧ3 ограничивают ширину спектра сигналов и подавляют высокочастотные помехи.

В канале измерения напряжения К1 сигнал с выхода ФНЧ1 поступает через аналоговый квадратор Кв1, фильтр ФНЧ2 и усилитель У1 на один из входов восьмиканального мультиплексора, встроенного в центральный процессор ЦП.

В канале измерения тока К2 сигнал с выходов ФНЧ3 подается на усилитель УУ1 с дискретно управляемым коэффициентом усиления, который может принимать значения: 1, 2, 4, 8.

Управление коэффициентом усиления усилителя УУ1 осуществляет микроконтроллер МК1. С выхода усилителя УУ1 сигнал поступает через аналоговый квадратор Кв2 на устройство выборки и хранения УВХ1, а также на делитель напряжения ДН7. Выходной сигнал делителя ДН7 подается на первый вход компаратора, встроенного в микроконтроллер МК1. На второй вход компаратора поступает пороговое напряжение с выхода цифроаналогового преобразователя ЦАП1, также управляемого микроконтроллером МК1.

Усилитель УУ2, квадратор Кв2, делитель напряжения ДН7, микроконтроллер МК1 и цифроаналоговый преобразователь ЦАП1 образуют автоматический масштабный преобразователь.

Блок-схема алгоритма функционирования микроконтроллера МК1 показана на рисунке 2. Микроконтроллер МК1 имеет три порта. Порт усиления ПУ, в котором хранится код управления коэффициентом усиления УУ1, подключен к входам управления усилителя УУ1. Порт порога сравнения ППС, в котором хранится код порога сравнения, подключен к входам управления ЦАП1, формирующего пороговое напряжение Z . Порт шины ПШ подключен через общую шину к центральному процессору ЦП.

Микроконтроллер МК1 последовательно формирует коды, которые ЦАП1 преобразует в максимальное $Z_{\text{макс}}$ и минимальное $Z_{\text{мин}}$ пороговые напряжения. Компаратор, встроенный в МК1, сравнивает выходное напряжение Y делителя ДН7 с порогами $Z_{\text{макс}}$ и $Z_{\text{мин}}$. При выполнении условия $Y > Z_{\text{макс}}$ коэффициент усиления УУ1 уменьшается в два раза. При выполнении условия $Y_{\text{вых}} < Z_{\text{мин}}$ коэффициент усиления УУ1 увеличивается в два раза. При выполнении условия $Z_{\text{макс}} > Y > Z_{\text{мин}}$ коэффициент усиления УУ1 не изменяется. Для предотвращения циклического переключения ступеней усиления, пороги $Z_{\text{макс}}$ и $Z_{\text{мин}}$ выбирают так, чтобы их отношение удовлетворяло условию $Z_{\text{макс}}/Z_{\text{мин}} > 4$.

При поступлении от центрального процессора ЦП строб-импульса микроконтроллер МК1 становится ведомым на время длительности этого импульса и передает в ЦП код текущего коэффициента усиления УУ1. По окончании строб-импульса МК1 переходит в автономный режим работы.

Устройство УВХ1 дискретизирует по времени выходной сигнал квадратора Кв2. Частота дискретизации и время хранения выборок сигнала задаются процессором ЦП. С выхода УВХ1 выборки сигнала поступают через мультиплексор на десятиразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Мультиплексор и АЦП встроены в центральный процессор ЦП.

Таким образом, автоматический масштабный преобразователь позволяет существенно расширить динамический диапазон и повысить точность канала измерения тока.

Процессор ЦП записывает десятиразрядный код квадрата сжатого сигнала в два восьмиразрядных регистра и анализирует код коэффициента усиления усилителя УУ1. Поскольку усиление сигнала в 2^i раз вызывает увеличение квадратора этого сигнала в 2^{2i} раз, то для восстановления исходного динамического диапазона сигнала его десятиразрядный код необ-

ходимо сдвинуть на $2i$ разрядов в сторону младших разрядов, что эквивалентно делению этого кода на 2^{2i} .

Программное обеспечение процессора ЦП позволяет осуществить восстановление истинного значения квадрата фазного тока, а также вычисление среднего квадрата всех фазных напряжений и токов на интервале

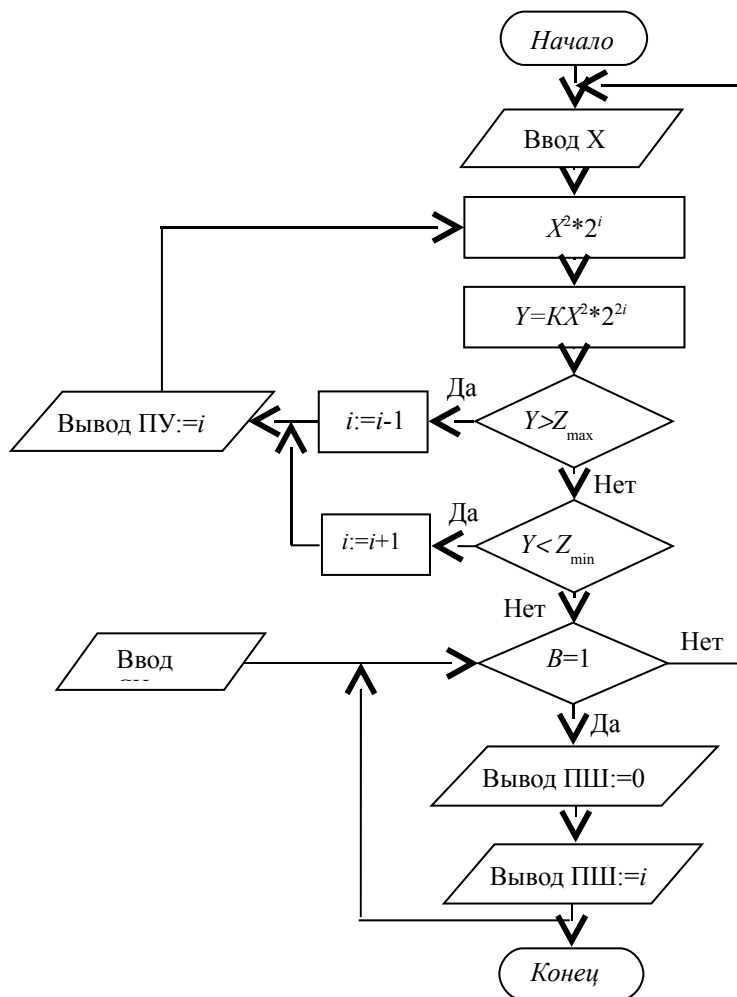


Рисунок 2 - Блок схема алгоритма работы МК канала измерения тока: X – входное напряжение усилителя УУ1; Y – выходное напряжение делителя ДН7; K – коэффициент передачи Кв2 и ДН7; Z – пороговое напряжение; СИ – строб-импульс

усреднения в соответствии с алгоритмом, описанным в работе [1]. При этом значения средних квадратов фазных токов представлены шестнадцатизрядными кодами, в отличие от значений средних квадратов фазных напряжений, представленных восьмизрядными кодами.

С учетом возможностей алгоритма вычисления среднего квадрата фазных токов и напряжений, предложенного в работе [3], число однобайтных ячеек памяти запоминающего устройства, необходимого для хранения результатов промежуточных вычислений, определяется соотношением

$$K_{\text{взз}} = (n_u + kn_i)[1 + 2\text{Int}(\log_2 N_g)] = 351,$$

где $n_u = 3$ и $n_i = 3$ – число усредняемых напряжений и токов соответственно; $k = 2$ – коэффициент, учитывающий двухбайтное представление кодов средних значений квадратов фазных токов.

Блок-схема алгоритма работы центрального процессора изображена на рисунке 3. Процессор ЦП воспринимает прерывание от одного источника (встроенного универсального синхронно–асинхронного приемопередатчика) и имеет следующие режимы работы: ожидания, просмотра меню, накопления результатов измерений и считывания информации. Управление режимами работы комплекса осуществляется с помощью клавиатуры.

В режиме ожидания измерительный комплекс работает непосредственно после включения напряжения питания. При этом он не производит измерения, а его центральный процессор ожидает ввода с клавиатуры команды для перехода в другие режимы работы.

В режиме просмотра меню оператор имеет возможность с помощью клавиатуры контролировать настройку и работоспособность комплекса, наблюдая текущие результаты мониторинга по показаниям жидкокристаллического индикатора ЖКИ (рисунок 1).

В режиме накопления результатов измерений процессор ЦП работает циклически. В течение каждого цикла ЦП последовательно преобразует аналоговые сигналы, поступающие с выходов каналов измерения напряжения и тока, в цифровые коды, вычисляет их средние значения и опрашивает температурные датчики ДТ1...ДТ16. Значения температуры, средних квадратов фазных напряжений и токов записываются в энергонезависимое запоминающее устройство ЭЗУ, где хранятся в течение мониторинга.

Одновременно с результатами измерений в ЭЗУ записываются временные отсчёты, которые соответствуют моментам окончания каждого цикла осреднения. Это позволяют идентифицировать во времени результаты измерений при последующей их обработке в ПК.

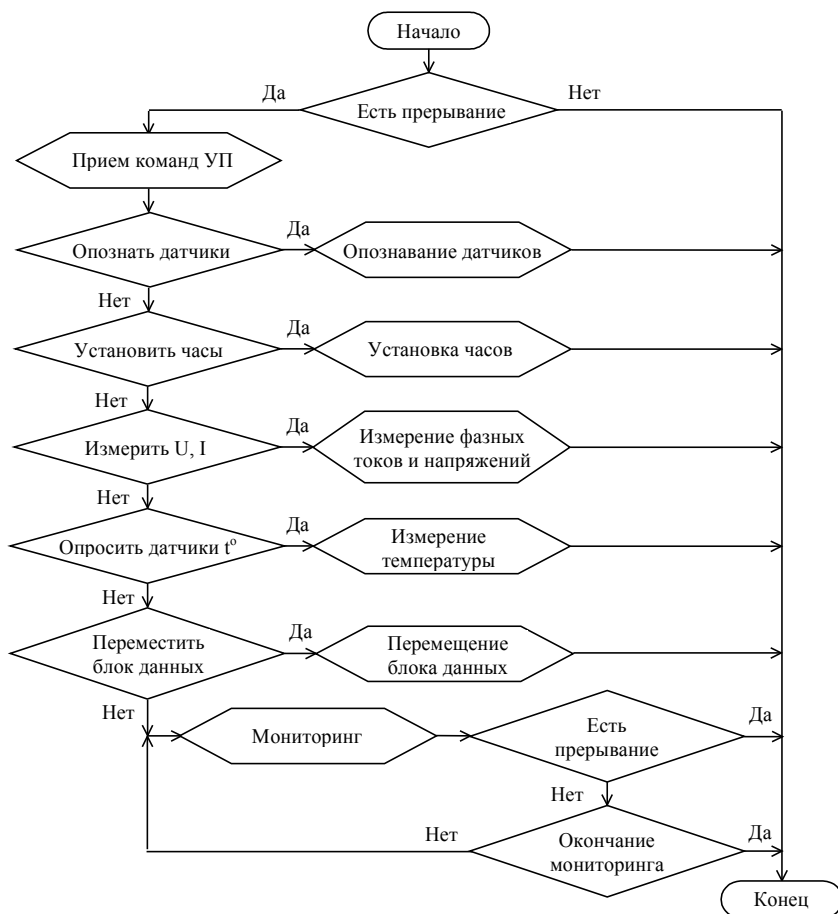


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы центрального процессора

После заполнения всего объема памяти ЭЗУ, центральный процессор выдает на индикатор ЖКИ сообщение об окончании мониторинга. Для считывания информации, накопленной в процессе мониторинга, оператор подключает измерительный комплекс к ПК и переводит комплекс в режим считывания информации. Считывание информации из ЭЗУ в память персонального компьютера производится через центральный процессор ЦП, двухпортовое запоминающее устройство ДПЗУ, управляющий процессор УП, устройство сопряжения УС.

Алгоритм работы управляющего процессора УП показан на рисунке 4.

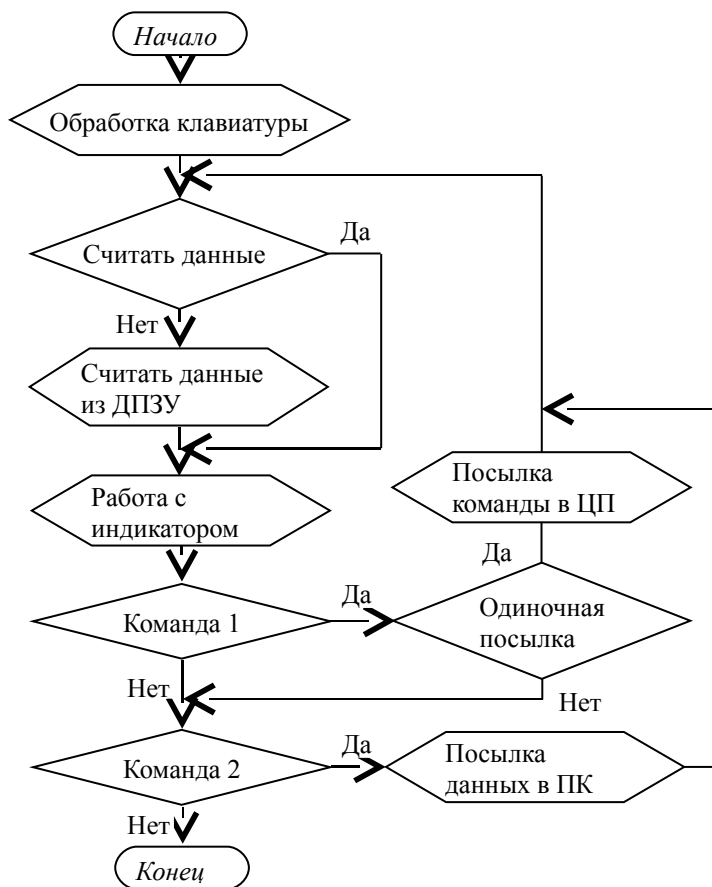


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма работы управляющего процессора

Модуль питания МП (рисунок 1) осуществляет электропитание измерительного комплекса либо от промышленной сети 220 В, 50 Гц, либо от аккумуляторной батареи АБ.

Автономный режим работы комплекса позволяет выполнять мониторинг режима охлаждения исследуемой электрической установки после выключения напряжения промышленной сети.

В качестве центрального процессора комплекса был использован микроконтроллер типа PIC16F877 фирмы Microchip, имеющий тактовую частоту 20 МГц и содержащий в своей структуре восьмиканальный мультиплексор и десятиразрядный АЦП.

С целью проверки выводов теоретического анализа были проведены экспериментальные измерения фазных токов и напряжений на трансформаторной подстанции мощностью 630 кВт. Анализ формы фазных напряжений показал, что в первом приближении их можно представить в виде суммы синусоидального напряжения 220 В, 50 Гц и периодической последовательности биполярных синусоидальных импульсов с амплитудой $\Delta U_m \leq 20$ В и углом отсечки

$$\theta \leq \arccos \frac{\sqrt{2}U_{ном} - \Delta U_m}{\sqrt{2}U_{ном}} = \arccos \frac{220\sqrt{2} - 20}{220\sqrt{2}} \approx 20^\circ.$$

При этом в спектре фазных напряжений присутствуют только нечётные высшие гармоники, амплитуды которых не превышают 0,7% от амплитуды фазного напряжения.

Если пренебречь влиянием высших гармоник, то в течение интервала усреднения фазные напряжения можно рассматривать как узкополосные случайные процессы, энергетический спектр которых сосредоточен в окрестности частоты 50 Гц и имеет эффективную ширину 5-10 Гц. Поэтому полоса пропускания ФНЧ, включенных на выходах квадраторов в каналах измерения напряжения (рисунок 1), была выбрана равной 30 Гц, при которой уровень подавления сетевого напряжения составил минус 70 дБ.

Поскольку АЦП, встроенный в центральный процессор ЦП, имеет время преобразования порядка 20 мкс, то выходные напряжения указанных ФНЧ могут быть преобразованы в цифровой код без предварительной обработки с помощью устройств выборки и хранения.

Определим средний квадрат фазного тока, полагая, что его огибающая является медленно изменяющейся функцией времени по отношению к напряжению сети 50 Гц, т.е.

$$\overline{i^2} = \frac{1}{T_{cp}} \int_0^{T_{cp}} I_o^2 [1 + m(t)]^2 \cos^2[\omega_c t + \psi(t)] dt = \overline{I_m^2} + \Delta I^2,$$

где T_{cp} – время осреднения; I_o – среднее значение амплитуды тока;

$$\overline{I_m^2} = \frac{I_o^2}{2T_{cp}} \int_0^{T_{cp}} [1 + m(t)]^2 dt \text{ – средний квадрат огибающей фазного тока;}$$

$$\Delta I^2 = \frac{I_o^2}{T_{cp}} \int_0^{T_{cp}} \frac{[1 + m(t)]^2}{2} \cos[2\omega_c t + 2\psi(t)] dt \text{ – отклонение среднего квадрата}$$

фазного тока от среднего квадрата его огибающей.

Так как $T_{cp} \gg T_c$, где $T_c = 2\pi/\omega_c = 20$ мс – период сетевого напряжения, то

$$\Delta I^2 \leq \frac{I_0^2}{T_{cp}} \int_0^{T_c/8} \frac{[1 + m_{\max}]^2}{2} \cos 2\omega_c t dt = \frac{I_0^2 (1 + m_{\max})^2 T_c}{8\pi T_{cp}},$$

где $m_{\max}$ – максимальное относительное изменение огибающей на интервале осреднения T_{cp} .

Следует отметить, что величина $m_{\max}$ может быть как меньше, так и больше единицы. Случай $m_{\max} \leq 1$ имеет место, когда $I_o > \Delta I_{m,\max}$, а случай $m_{\max} \geq 1$, когда $\Delta I_{m,\max} > I_o$, где $\Delta I_{m,\max}$ – максимальное изменение амплитуды тока.

Тогда относительная погрешность, вызываемая заменой среднего квадрата мгновенного фазного тока средним квадратом огибающей этого тока, равна

$$\delta = \frac{\Delta I^2}{I_m^2} = \frac{(1 + m_{\max})^2 T_c}{4\pi \int_0^{T_{cp}} [1 + m(t)]^2 dt}. \quad (4)$$

Анализ показывает, что в случае гармонической огибающей $m(t) = m_{\max} \cos \Omega t$ с частотой $\Omega \ll \omega_c$ погрешность (4) принимает вид

$$\delta = \frac{(1 + m_{\max})^2 T_c}{4\pi T_{cp} \left(1 + \frac{m_{\max}^2}{2} + \frac{m_{\max} T_o}{\pi T_{cp}} \left[\sin \Omega T_{cp} + \frac{m_{\max}}{8} \sin 2\Omega T_{cp} \right] \right)}, \quad (5)$$

где $T_o = 2\pi/\Omega$ – период огибающей.

Частоту огибающей можно оценить, определив интервалы нарастания T_n и спада T_c огибающей фазного тока по экспериментальным осциллограммам.

При $\Omega T_{cp} = 3\pi/2$ погрешность (5) достигает максимального значения:

$$\delta = \frac{(1 + m_{\max})^2 T_c}{4\pi T_{cp} \left(1 + \frac{m_{\max}^2}{2} - \frac{m_{\max} T_o}{\pi T_{cp}} \right)}, \quad (6)$$

Поскольку при $m_{\max} \leq 10$ погрешность (6) не превышает 0,1%, то в тех случаях, когда фазные токи представляют собой узкополосный случайный процесс, целесообразно определять средний квадрат фазного тока по его огибающей, что упрощает алгоритм обработки.

Определим число значений измеряемых величин, которые необходимо хранить в памяти измерительного комплекса в процессе мониторинга:

$$B = P \frac{T_M}{T_{CP}} = 22 \frac{10 \times 24 \times 60}{5} = 63360,$$

где $P=22$ – число измеряемых параметров; $T_M=10$ суток – продолжительность мониторинга; $T_{CP}=5$ мин – интервал усреднения квадратов фазных токов и напряжений.

Для обеспечения погрешности измерения $\delta=\pm 1\%$ необходимо аналоговые измеряемые величины преобразовывать в цифровой двоичный код с числом разрядов

$$r \geq \log_2(1/\delta) = \log_2(1/0,01) = 6,6. \quad (13)$$

В измерительном комплексе выбрано $r=8$. Учитывая, что средние значения квадратов фазных токов после восстановления их истинного масштаба, представлены шестнадцатиразрядными кодами, определяем требуемый объем памяти ЭЗУ комплекса:

$$I = B(1 + \frac{3}{P})I_o \approx 72000 \text{ Байт}. \quad (14)$$

В разработанном комплексе было использовано ЭЗУ объемом 128 кБайт.

В результате суточного мониторинга понижающего трансформатора мощностью 630 кВт, установленного на силовой электрической подстанции, были измерены временные зависимости средних квадратов фазных напряжений и токов, а также 16 значений температуры (фазных вводов и шин, масляного бака и окружающего воздуха).

Некоторые из указанных зависимостей после их обработки в персональном компьютере изображены на рисунке 5.

Разработанный комплекс может найти применение при проведении исследований и испытаний мощных электрических установок. Результаты мо-

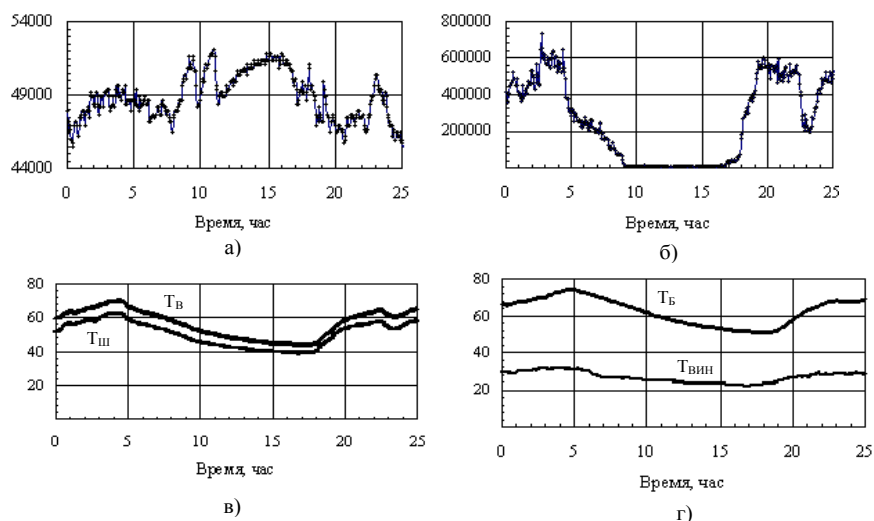


Рисунок 5 - Суточные изменения параметров трехфазного трансформатора подстанции:
а) - среднего квадрата напряжения фазы А; б) - среднего квадрата тока фазы А; в) - температур ввода $T_{\text{в}}$ и шины $T_{\text{ш}}$ фазы А; г) - температуры масляного бака $T_{\text{б}}$ и вентиляционного окна подстанции $T_{\text{вент}}$

мониторинга могут быть использованы в качестве калибровочных данных при разработке моделей, имитирующих распределения температуры внутри электрических установок. На базе описанного комплекса возможно создание систем текущего контроля теплового режима мощных электрических установок и их защиты от перегрева на начальной стадии его возникновения.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам испытательной лаборатории предприятия “ТавридаЭлектрик”, которые тщательно выполнили испытания разработанного комплекса, а также группе электриков, без чьей помощи и участия было бы невозможным проведение мониторинга силового трансформатора электрической подстанции.

Библиографический список

1. David J Power transformer design enhancements made to increase operational life / J. David, J.C. Woodcock, P.E. Wright // Transactions of Second Annual Techn. Conf. 2003, <http://www.weidmannb2b.biz/wacti/wacti2003conference>

2. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение 1000 В. Введ. 01.01.80. — М.: Изд-во стандартов, 1994. — 105 с.

3. Зиборов С.Р. Алгоритм быстрого вычисления среднего значения квадрата аналогового сигнала / С.Р. Зиборов, И.Б. Широков // Вестн. СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь, 2002. — Вып. 41. — С. 101–107.

Поступила в редакцию 18.12.2002 г.