УДК 621.316.925

Д.И.ИВАНЧЕНКО, *студент, dan87332@mail.ru*
О.Б.ШОНИН, *д-р техн. наук, профессор, ninosh_eltech@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

D.I.IVANCHENKO, *student, dan87332@mail.ru,*
O.B.SHONIN, *Dr. in eng. sc., professor, ninosh_eltech @mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ЦИФРОВОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрены возможности применения теории фильтрации Калмана для реализации цифровой дифференциальной защиты силовых трансформаторов. Описан выбор переменных состояния для идентификации повреждения и критерий срабатывания защиты. Проведено сравнение времени срабатывания защит, основанных на фильтре Калмана и на преобразовании Фурье.

Ключевые слова: фильтр Калмана, цифровая дифференциальная защита, силовой трансформатор.

APPLICATION OF KALMAN FILTER FOR DIGITAL DIFFERENTIAL PROTECTION RELAY OF POWER TRANSFORMERS

The paper is dedicated to analyzing the use of Kalman filtering theory for Application in digital differential protection relay of power transformers. The state variables for the fault identification and protection operation criteria are described. Comparison of operation times of differential protections, based on Kalman filtering theory and Fourier algorithm is presented.

Key words: Kalman filter, digital differential protection, power transformer.

Одним из основных средств защиты силовых трансформаторов является дифференциальная защита, основанная на сравнении токов первичной и вторичной обмоток трансформатора [2]. При отклонении этих токов от заранее определенной зависимости считается, что в трансформаторе произошло короткое замыкание, и трансформатор отключается от сети. Основная задача релейной защиты состоит в минимизации повреждений трансформатора, с одной стороны, и исключении ложных срабатываний, с другой. В связи с этим релейная защита должна обладать высокими показателями чувствительности, быстродействия и селективности. Эти показатели зависят от выбора информативных параметров сигналов, алгоритма их обработки и принятого критерия обнаружения внутренних замыканий в трансформаторе.

В качестве информативных параметров защиты могут быть использованы относительные значения гармоник контролируемого тока, распределение которых в спектре сигнала зависит от вида возмущений в сети. Время спектрального анализа на основе преобразования Фурье не может быть меньше периода напряжения сети $T = 20$ мс. С учетом существующей тенденции наращивания мощностей распределительных сетей, соответствующего роста токов короткого замыкания и снижения времени разрушительного действия этих токов возникает необходимость обоснования и использования более быстрых алгоритмов [1]. К таким алгоритмам можно отнести алгоритм фильтра Калмана, используемый для оптимальной оценки сигналов дискретного времени $t_k = kT_d$, где T_d – период дискретизации [4]. Эффективность

алгоритма достигается за счет использования предварительной информации о процессе для последующего уточнения состояния путем сравнения оценки с результатами измерения. В работе рассматривается структура и модель фильтра Калмана, построенная в системе Simulink Matlab, производится оценка быстродействия и селективности алгоритма на фоне сигнала небаланса, вызванного бросками токов включения ненагруженного трансформатора.

В задаче оптимальной фильтрации используется модель процесса в форме уравнений относительно вектора переменных состояния $x_k = x(t_k)$ и модель измерений, связывающая вектор x_k и вектор измерений z_k:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k; \quad z_k = Hx_k + v_k, \qquad (1)$$

где A – матрица динамики процесса; H – матрица измерений; $w_k = N(0, W_k)$ – вектор Гауссова белого шума с нулевым математическим ожиданием ($< w_k >= 0$) и ковариационной матрицей $W_k = < w_k w_k^T >$; $v_k = (0, V_k)$ – вектор белого шума измерений.

Случайные процессы w_k и v_k считаются независимыми, их задают ковариационными матрицами шума процесса (Q_k) и шума измерения (R_k). Точность оценки $\hat{x}_k$ процесса x_k описывается ковариационной матрицей $P_k = < e_k e_k^T >$, где $e_k = x - \hat{x}_k$ – вектор ошибки.

Алгоритм Калмана является рекурсивным. На первом этапе вычислений используется априорное знание о процессе $\hat{x}_k^-$ и $\hat{P}_k^-$. Апостериорная оценка $\hat{x}_k$ находится с учетом вектора измерений z_k:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k + H_k \hat{x}_k^-)^{-1}. \qquad (2)$$

Матрица K_k дает значения коэффициентов, которые минимизируют ковариационную матрицу P_k ошибки апостериорной оценки:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}. \qquad (3)$$

Матрица P_k вычисляется через коэффициенты усиления фильтра Калмана и матрицу априорной оценки P_k^-:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-. \qquad (4)$$

На втором этапе делается прогноз переменных состояния $\hat{x}_{k+1}^-$, а также прогноз ошибки P_{k+1}^- для следующего шага вычислений:

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k; \quad P_{k+1}^- = A_k H_k A_k^T + Q_k. \qquad (5)$$

При соблюдении условий наблюдаемости [3] системы модель сигнала – наблюдение влияние приближенно заданных начальных условий x_0^- и P_0^- постепенно нивелируется и фильтр переходит в установившийся режим работы. Следует отметить, что чем точнее априорные знания о процессе и шумах системы, тем выше быстродействие алгоритма.

Структурная схема фильтра Калмана, построенная с помощью вычислительных блоков Simulink Matlab, показана на рис.1.

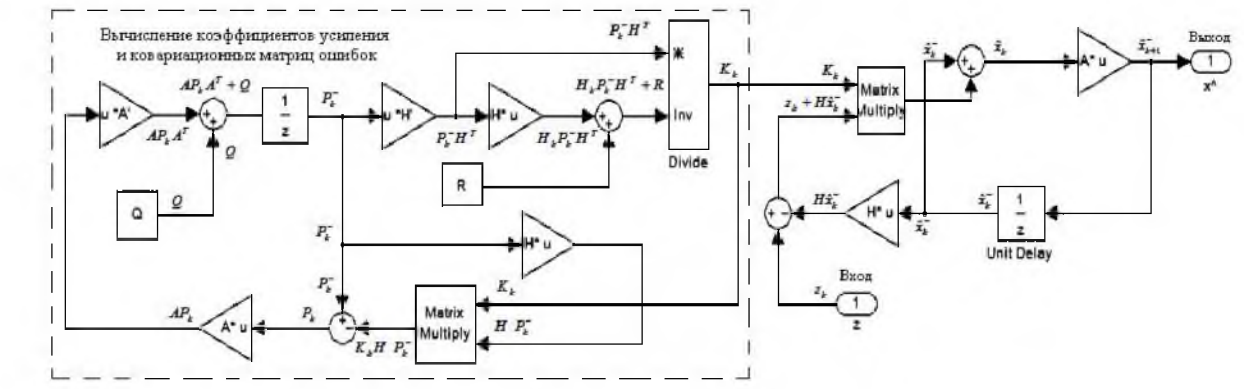


Рис.1. Структурная схема фильтра Калмана в среде Simulink Matlab

Представим сигналы релейной защиты в терминах теории фильтра Калмана. Полезные сигналы и сигналы небаланса дискретного времени $t_k = kT_d$ можно рассматривать как суперпозицию апериодической ($i_a[k]$) и периодической ($i_c[k]$) составляющих:

$$i_a[k] = I_0 \exp(-kT_d / \tau);$$

$$i_s[k] = \sum_{n=1}^{p} I_{mn} \sin(\Theta_n k + \psi_n), \qquad (6)$$

где τ – постоянная времени; I_{mn} и ψ_n – амплитуда и фаза n-й гармоники с частотой $\omega_n = n\omega_1$; $\Theta_n = \omega_n T_d$; ω_1 – частота сети; p – номер гармоники, соответствующий эффективной полосе частот спектра сигнала.

Периодическая составляющая $i_{sn}[k]$ описывается с помощью проекций $x_{cn}[k]$ и $x_{sn}[k]$ комплексного вектора $X_{mn} \exp[j(\Theta_n k + \psi_n)]$ на действительную и мнимую оси. Учитывая формулы косинуса (синуса) суммы двух аргументов, получим

$$x_{cn}[k+1] = x_{cn}[k]\cos\Theta_n - x_{sn}[k]\sin\Theta_n;$$
$$x_{sn}[k+1] = x_{cn}[k]\cos\Theta_n + x_{sn}[k]\sin\Theta_n.$$

Для n-й гармоники подматрица динамики процесса A_n принимает вид

$$\begin{bmatrix} x_{cn} \\ x_{sn} \end{bmatrix}_{k+1} = A_n \begin{bmatrix} x_{cn} \\ x_{sn} \end{bmatrix}_k; \quad A_n = \begin{bmatrix} \cos\Theta_n & -\sin\Theta_n \\ \cos\Theta_n & \sin\Theta_n \end{bmatrix}.$$

Используя выражение для апериодической составляющей $i_a[k+1] = I_0 \exp(-T_d / \tau) \times i_a[k]$, получим матрицу динамики наблюдаемого процесса:

$$A = \mathrm{diag}[A_1, A_2, \ldots A_L, I_0 \exp(-T_d / \tau)].$$

Матрица измерений принята в виде $H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Для проверки разработанной модели фильтра Калмана рассматривалась защита однофазного трансформатора как составного элемента группового трехфазного трансформатора. Использовались результаты спектрального анализа сигналов дифференциальной защиты при внутреннем замыкании, при включении ненагруженного трансформатора и внешнем замыкании. Рассматривался простейший случай выделения фильтром Калмана полезного сигнала на фоне тока небаланса, вызванного бросками тока намагничивания трансформатора по критерию $\hat{I}_2 = I_2 / I_1 < 0{,}25$, где I_1 и I_2 – действующие значения первой и второй гармоник. Режиму включения трансформатора, при котором срабатывание защиты недопустимо, соответствуют $\hat{I}_2 > 0{,}25$, режиму внутреннего замыкания, при котором трансформатор отключается – $\hat{I}_2 < 0{,}25$, сигнал представлен апериодической составляющей, первой и второй гармониками. Выс-

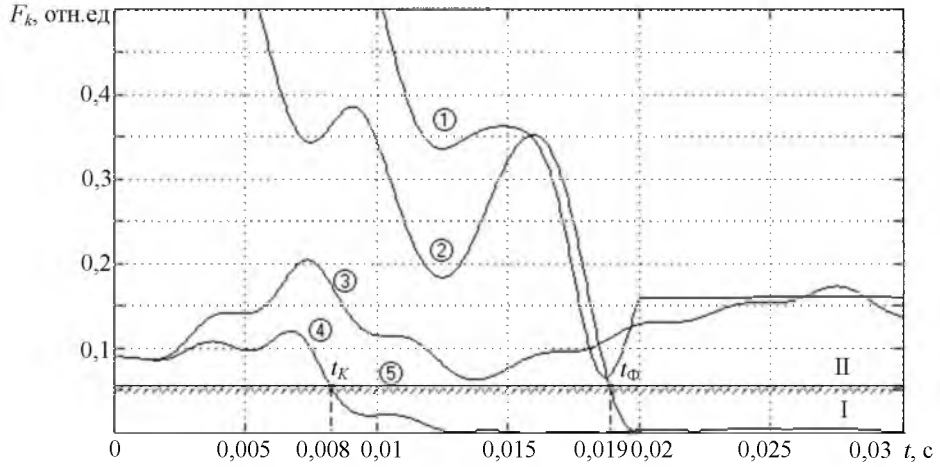


Рис.2. Динамика изменения критерия срабатывания $F(t)$ при внутреннем коротком замыкании (кривые 2 и 4) и включении ненагруженного трансформатора (кривые 1 и 3)

1 и 2 – согласно алгоритму Фурье; 4 и 3 – по алгоритму Калмана; 5 – константа, соответствующая уставке $D_k = 0{,}0625$, разделяющей область срабатывания защиты (I) и область регистрации режима включения трансформатора (II)

шие гармоники учитывались ковариационной матрицей шума измерения $R = \sigma^2 \cdot \underline{1}$, где $\sigma^2 = 0{,}1$ – дисперсия шума; $\underline{1}$ – единичная матрица. Вариация амплитуды апериодической составляющей учтена последним элементом диагональной матрицы шума процесса $Q = \mathrm{diag}[0, 0, 0, 0, 0.1]$. Токи выражаются в безразмерных единицах относительно номинального тока трансформатора. Постоянная времени апериодической составляющей τ принята равной 0,1 с, начальное состояние процесса – нулевым. Ковариационная матрица начальной ошибки $P_0^- = \mathrm{diag}[1.0, 1.0, 0.4, 0.4, 0.5]$ учитывает дисперсию гармонического процесса при равномерном распределении начальной фазы.

Оценки первой и второй гармоник $I_1^2 = x_{c1}^2 + x_{s1}^2$ и $I_2^2 = x_{c2}^2 + x_{s2}^2$ используются для формирования критерия $F = \hat{I}_2^2 = I_2^2 / I_1^2$, который сравнивается с уставкой $D = 0{,}0625$. Динамика изменения во времени критерия $F(t)$ для случаев внутреннего короткого замыкания и включения ненагруженного трансформатора показана на рис.2.

Время обнаружения внутреннего замыкания с помощью алгоритма Калмана $t_K = 8$ мс определялось как момент пересечения кривой $F_4(t)$ уровня уставки $D = 0{,}0625$. Кривая $F_3(t)$ соответствует работе фильтра Калмана при регистрации токов включения трансформатора. Поскольку $F_3(t) > D$, то сигнал на срабатывание защиты в этом случае не подается . Кривые $F_1(t)$ и $F_2(t)$ отражают работу алгоритма Фурье при сигналах включения трансформатора и внутреннего короткого замыкания соответственно. Из условия $F_2(t_\Phi) \le D$ следует, что время обнаружения внутреннего короткого замыкания с помощью алгоритма Фурье $t_\Phi = 19$ мс, что более чем вдвое превышает время обнаружения аварийного состояния с помощью алгоритма Калмана.

Результаты моделирования показывают, что применение алгоритма Калмана позволяет повысить быстродействие дифференциальной защиты трансформатора при сохранении требуемого уровня селективности. Этот алгоритм может быть использован как составная часть более сложных алгоритмов без существенного усложнения процесса настройки. Для достижения максимального быстродействия алгоритма, зависящего от параметров P, Q и R, а также обоснования критериев отстройки от других видов тока небаланса требуется подробное исследование переходных процессов в трансформаторе, вызванных изменениями режима сети с учетом влияния высших гармоник токов нелинейной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хренников А.* Силовые трансформаторы. Проблемы электродинамической стойкости // Новости электротехники. 2008. № 6 (54).

2. *Циглер Г.* Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения. М., 2005.

3. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. М., 1975.

4. *Moreno V.M., Pigazo A.* Kalman Filter: Recent Advances and Applications. I-Tech, Vienna, Austria, 2009.

REFERENCES

1. *Khrennikov A.* Power transformers. Problems of electrodynamic durability // News of electrical engeneering. 2008. N 6 (54).

2. *Ziegler G.* Numerical differential protection: principles and applications. Moscow, 2005.

3. *Akhoff P.* Philosophy control systems identification. Estimation of state variables. Moscow, 1975.

4. *Moreno V.M., Pigazo A.* Kalman Filter: Recent Advances and Applications. I-Tech, Vienna, Austria, 2009.