

РЕГУЛЯТОР ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТОКА С АДАПТАЦИЕЙ

Г.И. Волович, И.Р. Адыгамов

Рассматривается цифровое адаптивное управление источником тока, нагруженным на активно-индуктивный двухполюсник, в случае, когда параметры двухполюсника изменяются в очень широких пределах. Приводится алгоритм идентификации нагрузки и алгоритм настройки регулятора. Применен нерекурсивный алгоритм, базирующийся на использовании входного воздействия почти прямоугольной формы. По вычисленным параметрам двухполюсника выбирается коэффициент усиления регулятора, обеспечивающий частоту среза примерно в 20 раз меньше, чем частота выборки аналого-цифрового преобразователя регулятора. Приведены структура и результаты моделирования адаптивного регулятора тока в пакете VisSim при различных нагрузках.

Ключевые слова: адаптация, регулирование тока.

Введение

Измерением сопротивления постоянному току обмоток силовых трансформаторов выявляются дефекты:

- в местах соединений ответвлений к обмотке;
- в местах соединений выводов обмоток к выводам трансформатора;
- в местах соединения отпаяк к переключателю;
- в переключателе – в контактах переключателя и его сочленениях.

Для измерения сопротивления постоянному току обмоток трансформаторов большой мощности к контролируемой обмотке прикладывают постоянное напряжение и, после установления тока через обмотку, измеряют этот ток и падение напряжения на обмотке и находят сопротивление как отношение этих величин [1].

Такой способ занимает значительное время, так как индуктивность обмоток трансформаторов может быть значительной, и время установления тока до 0,999 от установившегося значения

$$t_{0,999} = 6,9 \frac{L_T}{R_T + R_{\Pi}}, \quad (1)$$

где L_T – индуктивность обмотки; R_T – сопротивление обмотки; R_{Π} – сопротивление соединительных проводов, может достигать нескольких десятков минут.

Для сокращения времени установления тока во многих приборах, выпускаемых промышленностью, например, DWR-10, Accu-Trans, ПТФ-1, МЭН-3 и др., применяются электронные регуляторы с обратной связью по току. Это позволяет сократить время переходных процессов измерительной цепи в несколько раз. Дальнейшее сокращение времени измерения затрудняется тем обстоятельством, что параметры нагрузки источника тока (контролируемой обмотки) могут различаться в зависимости от типа трансформатора в десятки тысяч раз и при использовании регулятора с неизменными параметрами может быть, что в каких-то случаях система «регулятор тока – обмотка трансформатора» будет иметь недостаточные запасы устойчивости, а в других – чрезмерное время установления тока.

Таким образом, необходимо настраивать параметры регулятора тока в соответствии с параметрами нагрузки, т. е. регулятор должен быть адаптивным. Процесс адаптации в данном случае должен состоять из двух этапов – идентификации нагрузки и настройки регулятора.

Идентификация параметров испытуемой обмотки

Блок-схема регулятора тока представлена на рис. 1. Здесь обозначено: МК – микроконтроллер; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УМ – усилитель мощности; ДТ – датчик тока; R_{Π} – сопротивление соединительных проводов; R_T , L_T – соответственно, сопротивление и индуктивность обмотки контролируемого трансформатора.

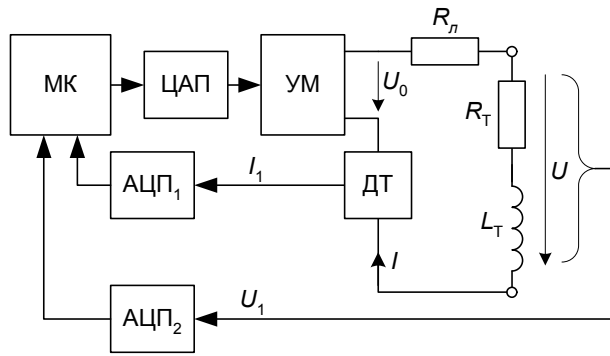


Рис. 1. Блок-схема регулятора тока

Идентификация осуществляется на этапе нарастания измерительного тока. Для ускорения этого процесса на выходе УМ устанавливается максимальное напряжение $u_0 = U_M$. Процессы в цепи описываются уравнением

$$L_T \frac{di(t)}{dt} + i(t)R_T = u(t). \quad (2)$$

Уравнения измерения:

$$u_1(t) = u(t), \quad i_1(t) = i(t) + \eta(t), \quad (3)$$

где $\eta(t)$ – помеха.

АЦП передают микроконтроллеру последовательность измеренных значений $u_1(t_k) = u_{1k}$,

$i_1(t_k) = i_{1k}$. Проинтегрировав (2) на интервале от t_k до t_{k+1} , найдем

$$L_T \int_{i_{k-1}}^{i_k} di + R_T \int_{t_{k-1}}^{t_k} idt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} udt,$$

или приблизительно

$$L_T(i_k - i_{k-1}) + R_T \frac{i_k + i_{k-1}}{2} T = \frac{u_k + u_{k-1}}{2} T, \quad (4)$$

где T – интервал дискретизации по времени.

Поменяв в уравнении (4) k на $k-1$, получим вместе с (4) систему из двух уравнений, относительно неизвестных параметров L_T, R_T , которая в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\mathbf{I}_k \cdot \boldsymbol{\theta}_k = \mathbf{U}_k, \quad (5)$$

где \mathbf{I}_k – матрица токов размера 2×2 , причем

$$i_{11(k)} = i_{11(k-1)} + i_k T, \quad i_{12(k)} = i_{12(k-1)} + i_{11(k)} T, \quad i_{21k} = i_{11(k-1)}, \quad i_{22k} = i_{12(k-1)}, \quad (6)$$

$\boldsymbol{\theta}_k = [L_k \ R_k]^T$ – вектор оценки параметров обмотки трансформатора; \mathbf{U}_k – вектор выборок напряжений, причем компоненты вектора

$$u_{1(k)} = u_{1(k-1)} + u_{(k)}^* T, \quad u_{2(k)} = u_{1(k-1)}, \quad u_{(k)}^* = u_{(k-1)}^* + u_{(k)} T. \quad (7)$$

Вектор оценки параметров на k -й выборке находится решением уравнения (5)

$$\boldsymbol{\theta}_k = \mathbf{I}_k^{-1} \cdot \mathbf{U}_k. \quad (8)$$

По достижении измерительным током 0,95 от заданного значения идентификация заканчивается и параметры регулятора устанавливаются согласно последней оценке параметров контролируемой обмотки.

Настройка регулятора

В системе используется пропорциональный регулятор. Структурная схема системы представлена на рис. 2. Здесь обозначено: K – коэффициент передачи регулятора;

$$A = K_C / (R_T + R_{II}), \quad (9)$$

причем K_C – коэффициент передачи датчика тока, $\tau = L_T / (R_T + R_{II})$.

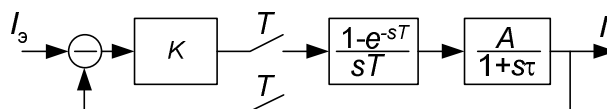


Рис. 2. Структурная схема системы

Дискретная передаточная функция звена первого порядка с запоминающим элементом нулевого порядка имеет вид [2]

$$W^*(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W(s)}{s} \right\}, \quad (10)$$

причем

$$W(s) = \frac{A}{1 + s\tau}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (10), после преобразований получим

$$W^*(z) = A \frac{1-d}{z-d}, \quad (12)$$

где $d = \exp(-T/\tau)$.

Характеристическое уравнение системы имеет вид

$$KW^*(z) + 1 = 0, \quad (13)$$

откуда с учетом (12) следует условие устойчивости

$$K < \frac{1}{A} \cdot \frac{1+d}{1-d}. \quad (14)$$

Поскольку, как правило, $\tau \gg T$, условие устойчивости можно приблизительно записать с учетом (9) в виде

$$K < \frac{2L_T}{K_C T}, \quad (14a)$$

Из условия (14a) следует, что при выборе запаса устойчивости по модулю 20 дБ (десятикратный запас устойчивости), коэффициент передачи регулятора должен рассчитываться по формуле

$$K = \frac{0,2L_T}{K_C T}. \quad (15)$$

Как видно из (15), коэффициент передачи регулятора не зависит от активного сопротивления измерительной цепи, что позволяет упростить алгоритм идентификации.

Полоса пропускания контура регулирования при выборе K по формуле (15) составляет приблизительно $0,1/T$, что, например, при $T = 0,2$ мс гарантирует установление тока при переходе от этапа нарастания к режиму стабилизации за единицы миллисекунд.

Статическая ошибка регулирования тока определяется модулем передаточной функции $KW^*(z)$ при $z = 1$, который при выполнении условия (15) равен

$$\left| KW^*(1) \right| = 0,2\tau / T. \quad (16)$$

Например, для обмотки 500 кВ трансформатора ОРНЦ-533000/500 этот коэффициент равен 600 000, а для обмотки 0,4 кВ трансформатора ТМ-250/10 – 190. Соответственно, ошибка регулирования в первом случае составит $1,7 \cdot 10^{-6}$, а во втором – 0,0053.

Результаты моделирования

Для подтверждения теоретических результатов проведено моделирование регулятора в пакете VisSim. Схема моделирования представлена на рис. 3. Модель регулятора (рис. 3, а) соответствует структурной схеме на рис. 2. Для нее справедливы уравнения (2) и (15). Модель идентификатора (рис. 3, б) осуществляет решение уравнений (3)–(8).

На рис. 4 приведены графики переходных процессов установления тока в обмотке с параметрами, близкими к параметрам обмотки высокого напряжения трансформатора ОРНЦ-533000/500. Кривая 1 представляет собой переходный процесс регулятора без адаптации, коэффициент усиления которого выбран равным 62,5, исходя из условия устойчивости регулятора во всем диапазоне изменения индуктивности (0,01...2000 Гн). Кривая 2 соответствует переходному процессу регулятора с адаптацией.

Из рис. 4 видно, что в этом случае время установления тока по крайней мере в 4 раза меньше, чем в случае регулятора без адаптации. Кроме того, в этом случае точность стабилизации измерительного тока также заметно выше.

На рис. 5 приведены графики переходных процессов установления тока в обмотке с параметрами, близкими к параметрам обмотки низкого напряжения трансформатора ТМ-250/10. В этом случае графики регуляторов с адаптацией и без нее практически совпадают.

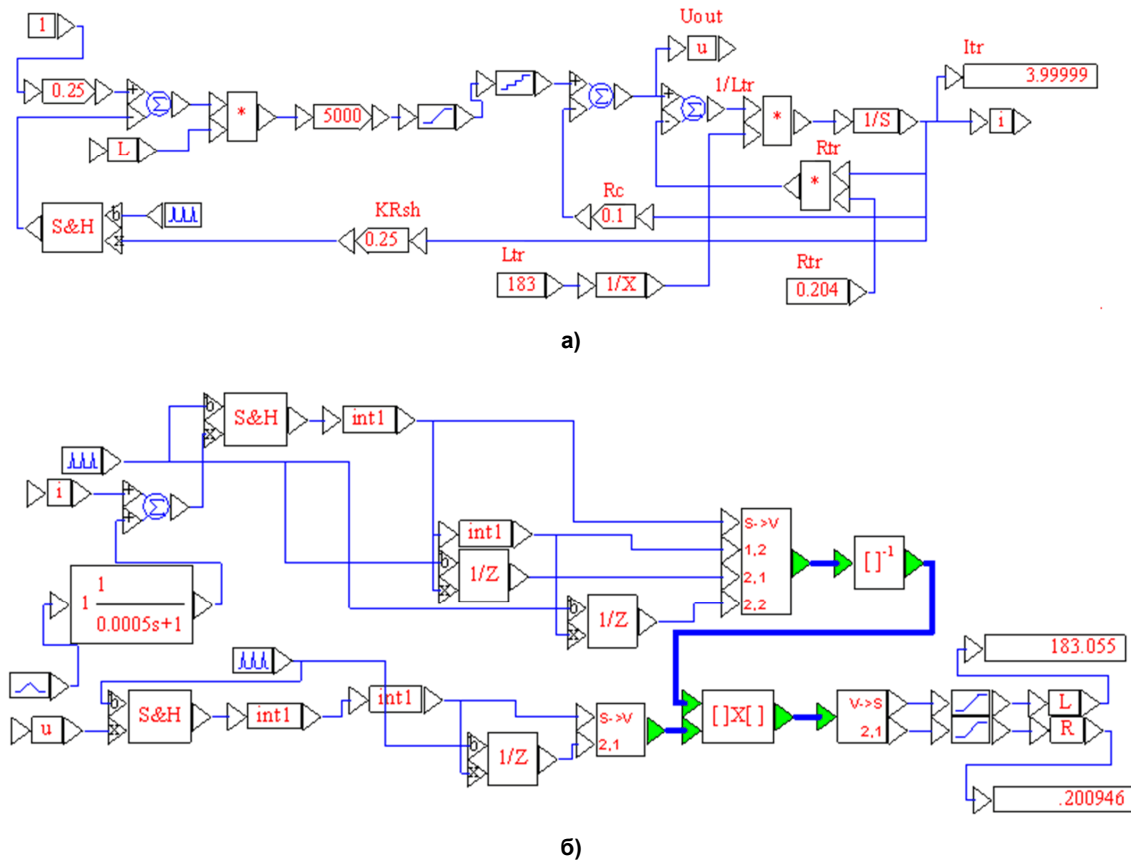


Рис. 3. Схема моделирования регулятора тока: а – регулятор; б – идентификатор

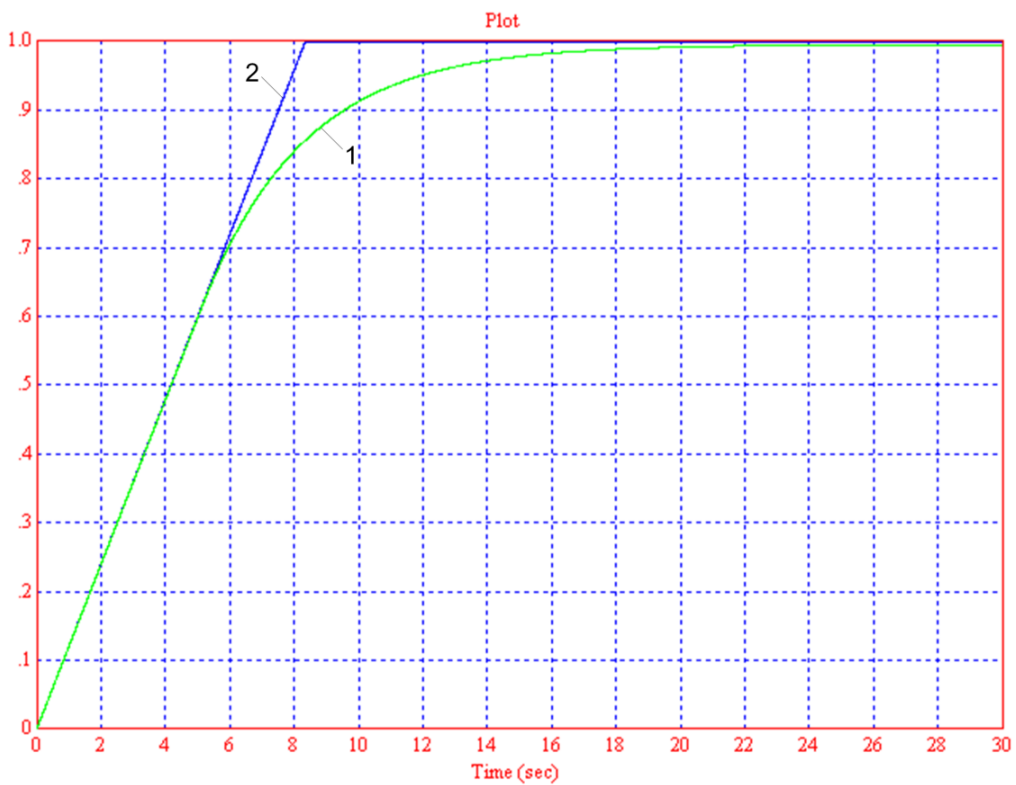


Рис. 4. Графики переходных процессов для обмотки высокого напряжения трансформатора ОРНЦ-533000/500

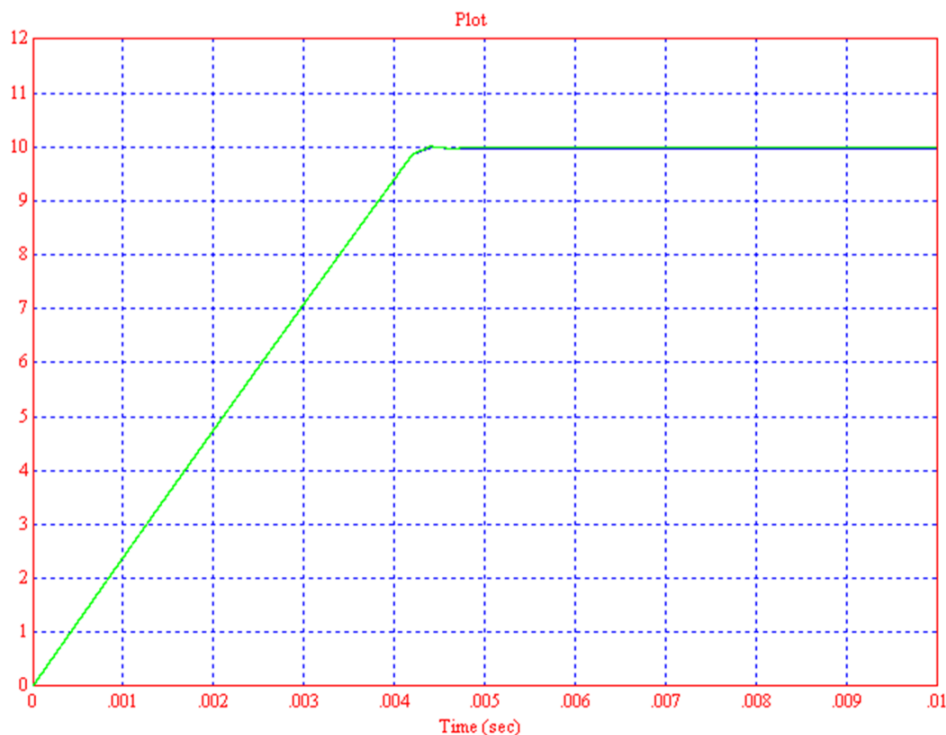


Рис. 5. Графики переходных процессов для обмотки низкого напряжения трансформатора ТМ-250/10

Выводы

Предложенный метод адаптации регулятора тока, включающий нерекуррентный алгоритм идентификации параметров нагрузки, обеспечивает быстрое установление измерительного тока в широком диапазоне нагрузок.

Литература

1. ГОСТ 3484.1–88. Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний.
2. Ротач, В.Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В.Я. Ротач. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издат. дом МЭИ, 2008. – 396 с.

Волович Георгий Иосифович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); g_volovich@mail.ru.

Адыгамов Индис Рахимжанович, аспирант кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); meteors3x@gmail.ru.

Поступила в редакцию 29 ноября 2013 г.

REGULATOR OF MEASURING CURRENT WITH ADAPTATION

G.I. Volovich, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
g_volovich@mail.ru,

I.R. Adygamov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
meteors3x@gmail.ru

This article describes a digital adaptive control of a source of the current loaded on an active-inductive two-pole, in a case when two-pole parameters change in very wide limits. The algorithm of identification of loading and algorithm of adjustment of a regulator is given. Not recursive algorithm which is based on use of entrance influence of almost rectangular form is applied. On the calculated parameters of a two-pole the factor of strengthening of the regulator gets out, providing frequency of a cut approximately in 20 times it is less, than frequency of sample of the analogue-digital converter of a regulator. The structure and results of modeling of an adaptive regulator of a current in package VisSim are resulted at various loadings.

Keywords: adaptation, current regulation.

References

1. GOST 3484.1-88. *Transformatory silovye. Metody elektromagnitnykh ispytaniy* [Power Transformers. Electromagnetic Test Methods].
2. Rotach V.J. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya vuzov* [The Automatic Control Theory: the Textbook for High Schools]. Moscow, Publ. house MEI, 2008. 396 p.

Received 29 November 2013