

УДК 621.313 : 519.237.7

Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля электрической машины

А.Б. Власов, Е.А. Мухин, Б.Д. Царев

Морская академия МГТУ, кафедра электрооборудования судов

Аннотация. Для диагностики технического состояния асинхронного двигателя на базе количественной термографии необходимо создание диагностической модели. Проведен факторный анализ и оценено влияние различных факторов на диагностическую модель асинхронного двигателя. Показано, что диагностическая модель устойчива к возможным погрешностям при определении различных параметров, используемых в расчетах.

Abstract. The thermovision diagnostic method of electric motors windings needs to create a diagnostic model for estimating influence of different parameters on stator windings heating. The factor analysis has been carried out and influence of different parameters on the diagnostic model of induction motor has been estimated. It has been shown that the diagnostic model is stable to possible errors during determining various parameters used in calculations.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, асинхронный двигатель, факторный анализ, диагностика технического состояния, количественная термография, температура обмотки, тепловая модель

Key words: thermovision control, asynchronous motor, factor analysis, operating conditions diagnostic, quantitative thermography, winding temperature, heat model

1. Введение

Задачей количественной термографии является определение диагностических параметров электрооборудования (в частности электрических машин) на основе термограмм, полученных при тепловизионном обследовании. Вычисленные значения параметров позволяют сделать экспертное заключение о техническом состоянии оборудования. Актуальным является решение проблемы определения температур внутренних элементов конструкции электрических машин в процессе эксплуатации, в том числе определение температуры статорной обмотки.

Диагностика технического состояния электрической машины (ЭМ) на базе количественной термографии требует создания диагностической модели, на основе анализа которой можно получить информацию о техническом состоянии ЭМ в процессе эксплуатации под нагрузкой. В работах (Власов, Мухин, 2011; Власов и др., 2010) представлена тепловая диагностическая модель асинхронного двигателя, позволяющая рассчитывать диагностические параметры технического состояния, в том числе температуру обмотки статора машины на основе количественной термографии, а также программа для ЭВМ, позволяющая оперативно реализовывать данную модель.

Исходными данными для диагностической модели являются геометрические параметры двигателя, характеристики конструкционных материалов, температуры различных областей внешней поверхности станины, состояние окружающей среды. При этом значения некоторых из этих параметров не удается определить с достаточной степенью точности по нескольким причинам:

- влияние погрешности экспериментального измерения температуры различных областей обрешенной поверхности машины;
- отсутствие необходимых для расчёта параметров в справочной литературе;
- зависимость некоторых параметров от температуры, изменяющейся во время эксплуатации машины.

Таким образом, актуальной задачей является оценка влияния различных факторов (параметров), учитываемых в диагностической модели, на расчет диагностических параметров технического состояния. Чтобы произвести подобную оценку, необходимо определить функциональную зависимость, описывающую взаимосвязь между различными факторами и агрегированной функцией, которой в данном случае является температура обмотки статора ЭМ.

Для нахождения функциональной зависимости используется методика полного факторного эксперимента (ПФЭ) второй степени для четырех параметров (Блохин и др., 1997; Власов, 2004). Агрегированная функция имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1X_{16} + b_2X_{26} + b_3X_{36} + b_4X_{46} + b_{12}X_{16}X_{26} + b_{13}X_{16}X_{36} + b_{14}X_{16}X_{46} + b_{23}X_{26}X_{36} + b_{24}X_{26}X_{46} + b_{34}X_{36}X_{46} + b_{11}X_{16}^2 + b_{22}X_{26}^2 + b_{33}X_{36}^2 + b_{44}X_{46}^2, \quad (1)$$

где X_{i6} – кодовые (безразмерные) значения параметров, принимающих на концах интервалов значения ± 1 ; i, j изменяются от 1 до 4.

2. Диагностическая модель электрической машины

Тепловая диагностическая модель ЭМ позволяет определять диагностические параметры технического состояния ЭМ, в том числе температуру обмотки статора, по данным количественной термографии. Исходными данными для расчета являются температуры локальных областей поверхности станины, полученные в результате обработки термограмм.

Согласно предлагаемому алгоритму расчета, по термограммам определяется наиболее горячая точка поверхности станины, которая расположена в центральной области поверхности станины, и находятся температуры в этой точке на конце ребра и у основания ребра. Также по термограммам определяются температуры на краях станины. Перепад температур на ребре (разница между температурой на конце ребра и у основания ребра) используется для расчета коэффициента теплоотдачи α поверхности станины.

3. Обоснование факторов, влияющих на расчёт диагностических параметров

Актуальным является оценка влияния погрешности измерения температуры поверхности станины статора. Температурная чувствительность тепловизора, используемого при диагностических мероприятиях, составляет 0,1 °С. Для оценки влияния погрешности измерения на расчет диагностических параметров технического состояния в качестве факторов для анализа были выбраны следующие параметры: температура поверхности станины в горячей точке у основания ребра (t_{max}), разница температур на конце ребра и у основания ребра в этой точке (Δt).

Для расчета температур различных областей поверхности станины статора разработана электротепловая схема конструктивных элементов АД, учитывающая пути распространения тепловых потоков от нагретого сердечника статора, позволяющая рассчитывать значения температуры различных областей поверхности станины статора с относительной погрешностью не более 7 %.

При расчете диагностических параметров АД важным является определение значения теплопроводности станины статора $\lambda_{ст}$ и теплопроводности изоляции паза обмотки статора $\lambda_{и}$. При этом в литературных источниках приводятся лишь примерные значения этих параметров. Для исследуемого АД значение теплопроводности станины статора $\lambda_{ст}$ равно 130 Вт/м·К, а значение теплопроводности пазовой изоляции $\lambda_{и}$ равно 0,16 Вт/м·К (Сипайлов и др., 1989; Борисенко и др., 1983).

Таким образом, для анализа были выбраны следующие факторы:

- температура поверхности станины в горячей точке у основания ребра (t_{max});
- перепад температур на ребре в горячей точке (Δt);
- теплопроводность станины статора $\lambda_{ст}$;
- теплопроводность пазовой изоляции обмотки статора $\lambda_{и}$.

4. Факторный анализ

Определим агрегированную функцию, описывающую взаимосвязь исследуемых факторов и температуры статорной обмотки двигателя, с помощью факторного анализа с использованием центрального композиционного ортогонального плана (ЦКОП).

Выбранные базовые значения факторов и шаги варьирования приведены в табл. 1. Например, базовое значение температуры у основания ребра станины в горячей точке $X_1 = 57,4$ °С. Для проведения факторного анализа значения управляемых переменных (факторов) X_i приводятся к безразмерным величинам по соотношению:

$$X_{i\bar{0}} = (X_i - X_{i0}) / \Delta X_i, \quad (2)$$

где X_{i0} – базовые значения факторов; ΔX_i – шаги варьирования факторов.

Общее число опытов N , необходимое для описания процесса, определяется соотношением $N = 2^m + 2m + 1$. При количестве факторов $m = 4$ число опытов $N = 25$.

Уравнение, которым описывается совокупное влияние четырех факторов, представляется в виде (1). Известно, что коэффициенты полинома (1) при ортогональном планировании независимы друг от друга, и некоторые из них, если доказана их малость относительно остальных, могут не учитываться в расчетах.

Коэффициенты b полинома (1) рассчитываются по формуле:

$$b_i = \sum_{k=1}^N X_{ik\bar{0}} Y_k / \sum_{k=1}^N X_{ik\bar{0}}^2, \quad (3)$$

где N – количество экспериментов, k – номер эксперимента.

Рассмотрим ортогональный центральный композиционный план для учета четырех факторов $X_1 \dots X_4$. Для этого используем матрицу планирования (табл. 3), в которой приведены значения безразмерных переменных в соответствии с данными табл. 1. Рассчитанные по формуле (3) значения коэффициентов полинома b_i приведены в табл. 4.

Таким образом, получен следующий полином:

$$Y = 89,148 + 0,029X_{1\bar{0}} + 1,332X_{2\bar{0}} - 0,396X_{3\bar{0}} - 2,845X_{4\bar{0}} + 0,015X_{1\bar{0}}X_{2\bar{0}} + 0,033X_{1\bar{0}}X_{3\bar{0}} + 0,055X_{2\bar{0}}X_{3\bar{0}} + 0,007X_{2\bar{0}}X_{4\bar{0}} - 0,015X_{3\bar{0}}X_{4\bar{0}} - 0,053X_{1\bar{0}}^2 - 0,023X_{2\bar{0}}^2 + 0,044X_{3\bar{0}}^2 + 0,519X_{4\bar{0}}^2. \quad (4)$$

Таблица 1. Значения переменных при факторном анализе диагностической модели

Фактор	$t_{max}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{ст}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\lambda_{из}, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
Обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4
Базовое значение	57,4	3	130	0,16
Интервал варьирования	0,1	0,2	20	0,03
Верхний уровень $X_i = +1$	57,5	3,2	150	0,19
Нижний уровень $X_i = -1$	57,3	2,8	110	0,13
Звездная точка $X_i = 1,414$	71,54	7,535	158,26	0,21
Звездная точка $X_i = -1,414$	43,26	0,465	101,72	0,12

В табл. 3 даны значения температур статорной обмотки Y_ξ , рассчитанные на основе диагностической модели, и значения функции отклика Y_ϕ , рассчитанные по полиному, описываемым соотношением (1). Также в табл. 3 приведен процент отклонения δ функции отклика Y_ϕ от соответствующих значений Y_ξ . Значение процента отклонения функции отклика от расчетных значений составляет от 0 до 0,23 %.

После вычисления коэффициентов предполагаемой модели исследуемого процесса оценим их значимость с помощью критерия Стьюдента. Рассчитаем значения величины Y_i на основе диагностической модели (табл. 2), при соответствующем варьировании фактора X_2 (1-0,3; 1; 1+0,3).

Таблица 2. Расчетные данные величины Y_i при соответствующем варьировании фактора X_3

m/n	$Y_1(X_1=1; X_2=1; X_3=1; X_4=1)$	$Y_2(X_1=1; X_2=1+0,31; X_3=1; X_4=1)$	$Y_3(X_1=1; X_2=1-0,3; X_3=1; X_4=1)$	Y_{cp}	$s^2\{Y_{cp}\}$
1	87,46	155,14	57,35	99,9	2508,4
2	91,32	58,84	157,54	102,5	2530,1
3	93,8	164,62	61,95	106,7	2762
4	90,37	58,19	156,18	101,5	2494,8
5	85,54	54,73	148,99	96,4	2309,6
6	93,73	164,68	61,95	106,7	2766,5
7	88,12	156,09	57,82	100,6	2532,6
8	92,94	163,54	61,41	105,9	2734,7
9	84,6	53,98	147,55	95,3	2276,0
10	85,61	54,69	148,97	96,4	2309,8
11	90,37	58,28	156,29	101,6	2497,2
12	93,2	163,73	61,54	106,1	2736,6
13	87,2	154,95	57,22	99,7	2506,5
14	84,6	54,07	147,67	95,4	2278,3
15	88,05	156,16	57,82	100,6	2537
16	91,25	58,88	157,55	102,5	2530
17	88,64	79,85	81,92	83,4	21
18	88,6	79,75	81,84	83,3	21
19	90,73	208,49	63,48	120,9	5939,4
20	86,63	62,27	194,93	114,6106	4986,6
21	88,38	79,39	81,42	83,06432	22,2
22	89,25	80,59	82,72	84,18956	20,3
23	85,84	76,44	78,51	80,26418	24,4
24	93,69	85,44	87,53	88,88893	18,3
25	88,78	66,54	69,85	75,05624	143,9

Определяем среднее значение функции отклика Y_{cp} для каждого опыта (табл. 2):

$$Y_{cp} = \Sigma Y_i / n, \quad (5)$$

где n – параллельное число опытов.

Определяем дисперсию воспроизводимости эксперимента – среднее значение всех оставшихся на воспроизводимость эксперимента дисперсий функций отклика в параллельных опытах

$$s^2\{Y_i\} = \Sigma s^2(Y_{cp}) / (n - 1) = 44116,81 / 24 = 2146,2. \quad (6)$$

Дисперсия ошибок определения коэффициентов полинома будет равна:

$$s^2 = s^2(Y_i) / mn = 1838,5 / (25 \cdot 3) = 28,61,$$

где m – количество проведенных опытов.

Рассчитаем значение t -параметра по формуле (7) для каждого коэффициента и соответствующей ему дисперсии ошибки определения этого коэффициента:

$$t_i = b/(S^2\{Y_i\})^{0,5}. \quad (7)$$

Для коэффициента b_0 определяем значение t -параметра:

$$t_0 = b_0/(S^2\{Y_1\})^{0,5} = 89,148/(28,61)^{0,5} = 16,66. \quad (8)$$

Аналогичным образом определяем значения t -параметров всех коэффициентов полинома b_i .

Определяем число степеней свободы $\nu = n(m - 1) = 25 \cdot (3 - 1) = 50$. Критическое значение $t_{кр}$ параметра Стьюдента (Блохин и др., 1997) для коэффициента риска $\beta = 0,001$ и степени свободы $f = 50$ равно 3,51.

При сравнении значения $t_{кр}$ с соответствующим значением t -параметра можно утверждать (табл. 3), что коэффициенты $b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}$ являются незначимыми. В этом случае эффектом взаимодействия учитываемых параметров можно пренебречь и уточненная модель, описывающая исследуемый процесс, примет вид:

$$Y = b_0 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2. \quad (9)$$

Максимальное значение процента отклонения функции отклика от расчетных значений при использовании данного полинома составляет 2,63 %.

После уточнения вида модели необходимо проверить её на адекватность исследуемому процессу. Аппроксимирующий полином (9) имеет 5 членов, определяем теоретические значения функции отклика для каждого условия проведения опыта, соответствующего конкретного его номера (табл. 2). Определяем дисперсию адекватности в соответствии с параметром

$$s^2_{ад} = (1/5)\Sigma (Y_{\xi} - Y_{фзн})^2 = 41,47.$$

Таким образом, дисперсия адекватности $s^2_{ад}$ меньше дисперсии воспроизводимости эксперимента $s^2\{Y_i\}$, что говорит об адекватности модели вида (9).

Для анализа влияния каждого из факторов на значение диагностического параметра технического состояния – температуру обмотки статора двигателя, наглядно отобразим зависимость температуры обмотки от факторов, построив трехмерные поверхности (см. рис.). Для этого необходимо зафиксировать два фактора (были выбраны базовые значения факторов), а два других фактора будут выступать в качестве переменных.

Анализ полученных данных показал, что погрешность измерения температуры t_{max} в исследуемых пределах незначительно влияет на результат расчета температуры статорной обмотки двигателя. Напротив, увеличение величины перепада температуры на ребре Δt от 2,8 °C до 3,2 °C приводит к изменению $t_{об}$ примерно с 87,1 °C до 90 °C, то есть примерно на 3 % (рис. 1а). Это можно объяснить тем, что увеличение разницы температур на ребре связано с возрастающим тепловым потоком из объема и при постоянном значении коэффициента теплоотдачи поверхности станины двигателя увеличивается температура статорной обмотки $t_{об}$.

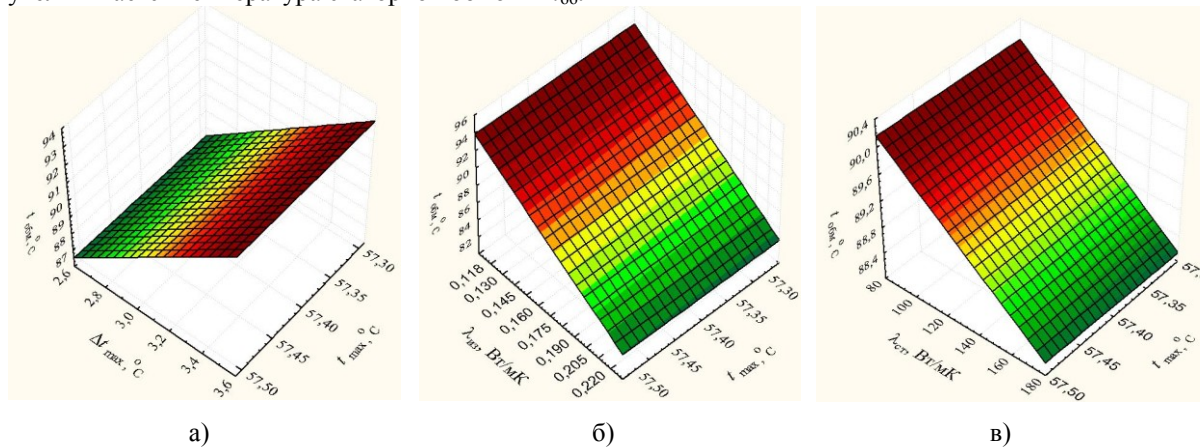


Рис. Зависимость температуры статорной обмотки $t_{об}$ от различных факторов:

- а) от температуры у основания ребра и перепада температуры на ребре; б) от температуры у основания ребра и коэффициента теплопроводности пазовой изоляции; в) от температуры у основания ребра и коэффициента теплопроводности станины статора

Повышение коэффициента теплопроводности станины $\lambda_{ст}$ со 110 Вт/м·К до 150 Вт/м·К (рис. в) приводит к изменению температуры обмотки с 89,2 °C до 88 °C (на 1,4 %). Физически это объясняется тем, что при большей теплопроводности станины двигателя теплопередача через металл станины

возрастает. Естественно, что при фиксированном тепловом потоке увеличение теплопроводности металла станины приводит к увеличению теплоотода.

При повышении теплопроводности пазовой изоляции $\lambda_{и}$ с 0,13 Вт/м·К до 0,19 Вт/м·К (рис. б) также происходит снижение температуры обмотки с 92,1 °С до 86,4 °С (на 6,2 %). Это является следствием того, что при большем значении теплопроводности изоляции теплоотдача во внешнюю среду увеличивается (теплоотвод возрастает) и, следовательно, статорная обмотка нагревается в меньшей степени.

Таблица 4. Расчетные значения коэффициентов полинома b_i

Коэффициенты	Полный набор	С учетом малости
b_0	89,148	
b_1	0,029	0
b_2	1,332	0
b_3	-0,396	0
b_4	-2,845	0
b_{12}	0,015	0
b_{13}	0,033	0
b_{14}	0	0
b_{23}	0,055	0
b_{24}	0,007	0
b_{34}	-0,015	0
b_{11}	-0,053	
b_{22}	-0,023	
b_{33}	0,044	
b_{44}	0,519	

5. Заключение

Проанализировано воздействие различных факторов на результаты расчетов температуры статорной обмотки ЭМ по диагностической модели АД.

Полученное аналитическое выражение для агрегированной функции Y может быть использовано для расчета важного параметра – температуры статорной обмотки асинхронного двигателя при различных условиях испытаний. Выявлено влияние наиболее значимых факторов в диапазоне их возможных значений в процессе эксплуатации.

Показано, что наибольшее влияние на расчет значения температуры статорной обмотки двигателя оказывает изменение значения теплопроводности $\lambda_{и}$ пазовой изоляции. Тем не менее, влияние всех факторов на расчет температуры обмотки статора при их изменении в исследуемых пределах мало, что доказывает устойчивость диагностической модели к возможным погрешностям при определении различных параметров, используемых в расчетах.

Литература

- Блохин В.Г., Глудкин О.П., Гуров А.И., Ханин М.А.** Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов. *Под ред. О.П. Глудкина. М., Радио и связь, 232 с., 1997.*
- Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И.** Охлаждение промышленных электрических машин. *М., Энергоатомиздат, 296 с., 1983.*
- Власов А.Б., Мухин Е.А.** Методика расчета температуры обмоток электрической машины на основе количественной термографии. *Вестник МГТУ, т. 14, № 4, с.671-680, 2011.*
- Власов А.Б., Мухин Е.А., Царев Б.Д.** Расчет температуры обмотки асинхронного двигателя по данным количественной термографии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616586, регистр. 24.08.2011, *Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010.*
- Власов А.Б.** Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля высоковольтных вводов. *Вестник МГТУ, т. 7, № 3, с.429-436, 2004.*
- Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А.** Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. *М., Высш. шк., 239 с., 1989.*

Таблица 3. Матрица планирования ортогонального центрального композиционного плана 2^4

№	X_{06}	X_{16}	X_{26}	X_{36}	X_{46}	$X_{16}X_{26}$	$X_{26}X_{36}$	$X_{36}X_{46}$	$X_{16}X_{46}$	$X_{16}X_{36}$	$X_{26}X_{46}$	$X_{16\pi}^2$	$X_{26\pi}^2$	$X_{36\pi}^2$	$X_{46\pi}^2$	$Y_{\xi}, ^\circ\text{C}$	$Y_{\phi}, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	87,46	87,46	0,00
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	91,32	91,18	0,15
3	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	93,80	93,73	0,08
4	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	90,37	90,28	0,10
5	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	85,54	85,55	0,01
6	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	93,73	93,75	0,02
7	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	88,12	88,08	0,04
8	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	92,94	93,01	0,08
9	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	84,60	84,55	0,06
10	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	85,61	85,51	0,12
11	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	90,37	90,38	0,01
12	1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	93,20	93,17	0,04
13	1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	87,20	87,31	0,12
14	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	84,60	84,64	0,05
15	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	88,05	88,11	0,06
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	91,25	91,22	0,03
17	1	1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	88,64	88,69	0,06
18	1	-1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	88,60	88,61	0,01
19	1	0	1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,8	1,2	-0,8	-0,8	90,73	90,60	0,15
20	1	0	-1,414	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,8	1,2	-0,8	-0,8	86,63	86,83	0,23
21	1	0	0	1,414	0	0	0	0	0	0	0	-0,8	-0,8	1,2	-0,8	88,38	88,29	0,10
22	1	0	0	-1,414	0	0	0	0	0	0	0	-0,8	-0,8	1,2	-0,8	89,25	89,41	0,18
23	1	0	0	0	1,414	0	0	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	85,84	85,77	0,08
24	1	0	0	0	-1,414	0	0	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	93,69	93,82	0,14
25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	88,78	88,76	0,02