А. А. Горшков, С. В. Востоков, С. М. Власьев
РЕГУЛЯРНЫЕ ФОРМАЛЬНЫЕ МОДУЛИ В ПОЛНЫХ МНОГОМЕРНЫХ ПОЛЯХ

1 Введение

При исследовании нормальных расширений без высшего ветвления возникла задача описания всех неразветвленных расширений локального поля, которые вместе с основным полем являются *регулярными*, то есть не содержащими нетривиальных p-х корней из 1 (где p — характеристика поля вычетов локального поля). Основное локальное поле при этом называется *вполне регулярным*. Эта задача была решена З.И. Боревичем в работе [3]. Основной результат этой работы, доказательство которого было упрощено Д.К. Фадеевым, является следующим.

Теорема 1.1. (З.И. Боревич, 1962). Для того, чтобы локальное поле K было вполне регулярным, необходимо и достаточно, чтобы показатель ветвления e расширения $K/\mathbb{Q}_p$ не делился на $p-1$.

Аналогичная задача возникает и в арифметике формальных модулей. Она и решается в настоящей работе. Чтобы сформулировать эту задачу в общем случае, введем необходимые обозначения. Сначала сделаем это для случая одномерного локального поля. Обозначения для многомерного локального поля введем в соответствующем разделе.

Пусть K — локальное поле, $\mathfrak{O}_K$ — его кольцо целых, $\mathfrak{M}_K$ — максимальный идеал в $\mathfrak{O}_K$, $F(X,Y)$ — одномерная коммутативная формальная группа над $\mathfrak{O}_K$ (далее мы будем писать просто формальная группа), $i(X)$ — её обратный элемент. Заметим, что на множестве $\mathfrak{M}_K$ можно задать структуру группы:

$$(\alpha +_F \beta)(X) = F(\alpha,\beta),\ \alpha,\beta \in \mathfrak{M}_K$$

$$(-_F\alpha)(X) = i(\alpha),\ \alpha \in \mathfrak{M}_K.$$

Теперь пусть π_0 — простой элемент в подполе K_0 поля K, $F(X,Y)$ — формальная группа над $\mathfrak{O}_K$ такая, что $\mathrm{End}_{\mathfrak{O}_K}(F) \cong \mathfrak{O}_{K_0}$.

Определение 1.1. Под *формальным* $\mathfrak{O}_{K_0}$*−модулем* $F(\mathfrak{M}_K)$ мы будем понимать $\mathfrak{O}_{K_0}$−модуль построенный на максимальном идеале $\mathfrak{M}_K$ кольца целых $\mathfrak{O}_K$ с помощью следующих операций:

$$\alpha +_F \beta = F(\alpha,\beta), \quad a\cdot\alpha = [a]_F(\alpha), \quad a \in \mathfrak{O}_{K_0}, \alpha,\beta \in \mathfrak{M}_K.$$

Определение 1.2. Обобщая определение регулярного локального поля в работе З.И. Боревича, мы называем локальное поле K (а вместе с ним и формальный модуль

$F(\mathfrak{M}_K)$) *регулярным относительно формальной группы* F, если K (а значит и $F(\mathfrak{M}_K)$) не содержит нетривиальных корней изогении $[\pi_0]_F$.

Определение 1.3. Будем называть локальное поле K (а вместе с ним и формальный модуль $F(\mathfrak{M}_K)$) ***вполне*** *регулярным относительно формальной группы* F, если любое его конечное неразветвленное расширение L/K (а значит и $F(\mathfrak{M}_L)$) является регулярным относительно формальной группы F.

Например, пусть $F_m = X + Y + XY$ — мультипликативная формальная группа. Эндоморфизмы умножения в F_m имеют вид: для $r \in \mathbb{N}$

$$[r]_{F_m}(x) = (1+x)^r - 1,$$

$$\operatorname{Ker}[p]_{F_m} = \{\xi = (\zeta - 1)\},$$

где ζ — первообразный корень p-ой степени из 1. Диаграмма полей выглядит в этом случае так:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Q}_p & \longrightarrow & L = K \\ \mathbb{Z}_p & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K \\ p & \longrightarrow & \pi \end{array}$$

Сформулируем теорему 1.1 в терминах регулярного формального модуля.

Теорема 1.2. Пусть K — регулярное локальное поле, $F_m(X,Y)$ — мультипликативная группа над $\mathbb{Z}_p$. Тогда поле K (а значит и формальный модуль $F_m(\mathfrak{M}_K)$) являются вполне регулярными относительно формальной группы F тогда и только тогда, когда индекс ветвления $e = e(K/\mathbb{Q}_p)$ не делится на $p-1$.

Таким образом, мы перенесли постановку задачи на область арифметики формальных модулей. Далее эта задача будет решаться для различных одномерных формальных групп (формальных модулей) как над одномерными локальными полями, так и над многомерными.

2 Основные обозначения

K — конечное алгебраическое расширение поля $\mathbb{Q}_p$,
K_0 — подполе в K,
T — подполе инерции в K со степенью инерции f_0,
$\mathfrak{O}_K$ — кольцо целых K, $\mathfrak{O}_{K_0}$ — кольцо целых K_0,
π — простой элемент $\mathfrak{O}_K$,
π_0 — простой элемент $\mathfrak{O}_{K_0}$,
$F(X,Y)$ — одномерная коммутативная формальная группа над $\mathfrak{O}_K$,
причем $\operatorname{End}_{\mathfrak{O}_K}(F) \cong \mathfrak{O}_{K_0}$,

L — расширение поля K, не содержащее $\mathrm{Ker}_F[\pi_0]$ (без нуля),
$\mathfrak{O}_L$ — кольцо целых L,
Π — простой элемент $\mathfrak{O}_L$.
Общая диаграмма (башня) полей выглядит так:

$$\begin{array}{ccccccc} \mathbb{Q}_p & \longrightarrow & K_0 & \longrightarrow & K & \longrightarrow & L \\ \mathbb{Z}_p & \longrightarrow & \mathfrak{O}_{K_0} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K & \longrightarrow & \mathfrak{O}_L \\ p & \longrightarrow & \pi_0 & \longrightarrow & \pi & \longrightarrow & \Pi \end{array}$$

3 Формальные модули в одномерных локальных полях

3.1 Случай многочленной формальной группы

Пусть K — конечное расширение поля $\mathbb{Q}_p$ и c — некоторая единица в K.

Определение 3.1. Формальную группу вида $F_c(X,Y) = X + Y + cXY$ назовем *многочленной формальной группой.*

Замечание 3.1. Известно, что $\mathrm{End}(F_c) \cong \mathbb{Z}_p$ (см. [7]), то есть в общем случае эта формальная группа не является группой Любина-Тейта. Однако, например, для $c \in \mathbb{Z}_p$ она таковой является.

Легко видеть, что

$$F_c(X,Y) = c^{-1}((1+cX)(1+cY)-1).$$

Тогда несложно доказать, что (см. например [2])

$$[p]_{F_c}(X) = c^{-1}([p]_{F_m}(cX)) = c^{-1}((1+cX)^p - 1),$$

$$\mathrm{Ker}[p]_{F_c} = \{\xi = c^{-1}(\zeta - 1)\},$$

где ζ — первообразный корень p-ой степени из 1.
Пусть $\xi \in \mathrm{Ker}[p]_{F_c}(X),\ \xi \neq 0$.

Лемма 3.1.

$$-p = ((\varepsilon(X)c)X)^{p-1}|_{X=\xi}, \text{ где } \quad \varepsilon \in 1 + \mathbb{Z}_p[c][|X|] \qquad (1)$$

Доказательство. Действительно, из определения $[p]_{F_c}(X)$ получаем

$$\frac{[p]_{F_c}(X)}{X} = p + C_p^2 cX + \ldots + C_p^{p-1}c^{p-2}X^{p-2} + (cX)^{p-1} =$$

$$= p\eta(X) + (cX)^{p-1},$$

где $\eta(X) = 1 + \frac{C_p^2}{p}cX + \ldots + \frac{C_p^{p-1}}{p}c^{p-2}X^{p-2} \in \mathbb{Z}[c][X]$. Поэтому

$$-p = \eta(X)^{-1}(cX)^{p-1}|_{X=\xi}$$

Так как $\eta(X)^{-1} \equiv 1 \pmod X$, то найдется ряд $\varepsilon(X) \in \mathbb{Z}[c][[X]]$,
$\varepsilon(X) \equiv 1 \pmod X$, такой что $\varepsilon(X)^{p-1} = \eta(X)^{-1}$. Тогда

$$-p = ((\varepsilon(X)c)X)^{p-1}|_{X=\xi}$$

□

Пусть L — конечное расширение поля $\mathbb{Q}_p$ и c - некоторая единица в L. Пусть $F_c(X,Y)$ — многочленная формальная группа над $\mathbb{Z}_p[c]$. Пусть $\xi \neq 0$ — корень изогении $[p]_{F_c}(X)$, причем $\xi \notin L$. Тогда диаграмма полей выглядит так:

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{Q}_p & \longrightarrow & \mathbb{Q}_p[c] & \longrightarrow & L \\ \mathbb{Z}_p & \longrightarrow & \mathbb{Z}_p[c] & \longrightarrow & \mathfrak{O}_L \\ p & \longrightarrow & \pi & \longrightarrow & \Pi \end{array}$$

Теорема 3.2. Поле L (а значит и $F_c(\mathfrak{M}_L)$) являются вполне регулярными относительно формальной группы $F_c(X,Y)$ тогда и только тогда, когда индекс ветвления $e = e(L/\mathbb{Q}_p)$ не делится на $p-1$.

Доказательство. Из равенства 1 леммы 3.1 следует, что

$$-p = (\varepsilon(\xi)c)^{p-1}\xi^{p-1},$$

то есть. $\sqrt[p-1]{-p} = (\varepsilon(\xi)c)\xi$. Отсюда получаем, что

$$L(\mathrm{Ker}[p]_{F_c}) = L(\xi) = L(\sqrt[p-1]{-p}) \tag{2}$$

Пусть $-p = \Pi^e\theta u$, где Π — простой элемент в L, $\theta \in \mathbb{R}$ — система Тейхмюллера в поле L, u — главная единица поля L.

1)Если $e \equiv 0 \pmod{p-1}$, то тогда

$$\sqrt[p-1]{-p} = \sqrt[p-1]{\Pi^e\theta}u_1,$$

где $u_1^{p-1} = u, u_1 \in L$. Откуда

$$L(\sqrt[p-1]{-p}) = L(\sqrt[p-1]{\theta}),$$

то есть расширение $L(\sqrt[p-1]{-p})/L$ - неразветвлено, а значит, согласно 2, расширение $L(\mathrm{Ker}[p]_{F_c})/L$ тоже неразветвлено, а значит $F_c(\mathfrak{M}_L)$ не является вполне регулярным модулем.

2) Если $e \not\equiv 0 \pmod{p-1}$, то

$$\sqrt[p-1]{-p} = \sqrt[p-1]{\Pi^e\theta}u_1,$$

и $L(\sqrt[p-1]{-p}) = L(\sqrt[p-1]{\Pi^e\theta})$ — разветвлено над L, откуда $F_c(\mathfrak{M}_L)$ — вполне регулярный модуль. □

Замечание 3.2. Условие неразветвленности получилось таким же, как и в случае мультипликативной формальной группы F_m.

3.2 Случай формальной группы Любина-Тейта

Определение 3.2. Пусть K — конечное расширение поля $\mathbb{Q}_p$. Введем $\mathfrak{F}_\pi$ как множество формально степенных рядов $f(X) \in \mathfrak{O}_K[|X|]$ таких, что

$$f(X) \equiv \pi X \pmod{deg\ 2}, \ f(X) \equiv X^q \pmod{\pi},$$

где π — простой элемент в K и q — количество элементов поля частных поля K.
Тогда по известной теореме (см. [1]) для каждого $f(X)$ из $\mathfrak{F}_\pi$ однозначно строится формальная группа F_π над $\mathfrak{O}_K$, которая называется *формальной группой Любина-Тейта*. Также по теореме отображение $\mathfrak{O}_K \to \mathrm{End}_{\mathfrak{O}_K}(F_\pi)$: $\alpha \mapsto [\alpha]_{F_\pi}$ является кольцевым гомоморфизмом и $f = [\pi]_{F_\pi}$.

Пусть формальная группа Любина-Тейта $F_\pi(X, Y)$ построена по изогении

$$[\pi](X) = \pi X + \pi a_2 X^2 + \ldots + X^q + \ldots \tag{3}$$

Заметим, что в этом случае $\mathfrak{O}_{K_0} = \mathfrak{O}_K, K_0 = K, \pi_0 = \pi$. Пусть L — расширение поля K такое, что $\mathrm{Ker}_{F_\pi}[\pi]$ (без нуля) не содержится в L. Тогда диаграмма полей имеет вид:

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{Q}_p & \longrightarrow & K & \longrightarrow & L \\ \mathbb{Z}_p & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K & \longrightarrow & \mathfrak{O}_L \\ p & \longrightarrow & \pi & \longrightarrow & \Pi \end{array}$$

Теорема 3.3. Поле L (а значит и $F_\pi(\mathfrak{M}_L)$) являются вполне регулярными относительно формальной группы F_π тогда и только тогда, когда индекс ветвления $e = e(L/K)$ не делится на $q - 1$.

Доказательство. Так как $F_\pi(X, Y)$ построена по изогении (3), то $[\pi](X)$ можно представить в виде:

$$[\pi](X) = \pi X \varepsilon(X) + X^q,$$

где $\varepsilon(X) \equiv 1 \pmod{X}$. Заметим, что так как $q-1$ и p взаимно просты, то из ряда $\varepsilon(X)^{-1}$ в этом случае можно извлечь в кольце $\mathfrak{O}_K[|X|]$ корень степени $q-1$. То есть существует ряд $u(X) \in 1 + X\mathfrak{O}_K[|X|]$ такой, что $u(X)^{q-1} = \varepsilon(X)^{-1}$, поэтому

$$\frac{[\pi](X)}{X} = \pi u(X)^{-(q-1)} + X^{q-1}$$

Получаем уравнение для корня изогении $X \neq 0$:

$$-\pi = (Xu(X))^{q-1} = Y^{q-1}$$

Так как L — расширение поля K, Π — простой в L, то для $e = e(L/K)$:
$$-\pi = \Pi^e \theta \eta(\Pi),$$
где $\eta(\Pi) \equiv 1 \pmod{\Pi}$ — главная единица.
1) Если $e = (q-1)e'$, то получим, что
$$-\pi = (\Pi^{e'} \eta_1(\Pi))^{q-1}\theta,$$
где $\eta_1^{q-1} = \eta$. И, значит,
$$Y = \Pi^{e'} \eta_1 \sqrt[q-1]{\theta},$$
где $\Pi^{e'}\eta_1 \in L$, а θ из неразветвленного расширения поля L. Таким образом, $L(Y)/L$ — неразветвлено, а значит $F_\pi(\mathfrak{M}_L)$ не является вполне регулярным модулем.
2) Если e не делится на $q-1$, то $L(Y) = L(\sqrt[q-1]{-\pi}) = L(\sqrt[q-1]{\Pi^e\theta})$ — разветвлено над L, откуда $F_\pi(\mathfrak{M}_L)$ — вполне регулярный относительно группы F модуль. □

3.3 Случай формальной группы Хонды

Пусть K — конечное неразветвленное расширение $\mathbb{Q}_p$. Рассмотрим $\triangle$ — оператор Фробениуса в $\mathfrak{O}_K[|X|]$:
$$\triangle(\sum a_i x^i) = \sum a_i^{Fr} x^{p\cdot i},\ a_i \in \mathfrak{O}_K,$$
где Fr — продолжение автоморфизма Фробениуса на $K/\mathbb{Q}_p$. Множество операторов $\sum_{i\geq 0} a_i\triangle^i$, где $a_i \in \mathfrak{O}_K$, образуют некоммутативное кольцо $\mathfrak{O}_K[|\triangle|]$ формальных степенных рядов от $\triangle$, для которого $\triangle a = a^{Fr}\triangle$ для $a \in \mathfrak{O}_K$.

Определение 3.3. Пусть K_0 — конечное расширение поля $\mathbb{Q}_p$, q — количество элементов поля частных поля K_0, K — конечное неразветвленное расширение K_0. Пусть π_0 — простой элемент в K_0. Формальная группа F над $\mathfrak{O}_K$ с логарифмом $log_F(X) \in K[|X|]$ называется *формальной группой Хонды*, если
$$u \circ log_F \equiv 0 \pmod{\pi_0}$$
для некоторого оператора $u = \pi_0 + a_1\triangle + \ldots \in \mathfrak{O}_K[|\triangle|]$. Оператор u называется *типом* формальной группы F.

Пусть опять K_0 — конечное расширение поля $\mathbb{Q}_p$, K — конечное неразветвленное расширение K_0. Пусть $F(X,Y)$ — группа Хонды над $\mathfrak{O}_K$ высоты h, $\mathfrak{O}_{K_0} \cong \mathrm{End}_{\mathfrak{O}_K} F$. Пусть L — расширение K такое, что $\mathrm{Ker}_F[\pi_0]$ (без нуля) не содержится в L. Тогда диаграмма полей имеет вид:
$$\begin{array}{ccccccc}
\mathbb{Q}_p & \longrightarrow & K_0 & \longrightarrow & K & \longrightarrow & L \\
\mathbb{Z}_p & \longrightarrow & \mathfrak{O}_{K_0} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K & \longrightarrow & \mathfrak{O}_L \\
p & \longrightarrow & \pi_0 & \longrightarrow & \pi_0 & \longrightarrow & \Pi
\end{array}$$

Теорема 3.4. Поле L (а значит и $F(\mathfrak{M}_L)$) являются вполне регулярными относительно формальной группы F тогда и только тогда, когда индекс ветвления $e = e(L/K)$ не делится на $q^h - 1$.

Доказательство. Заметим, что $e = e(L/K) = e(L/K_0)$, так как K/K_0 — неразветвлено по условию.
Пусть π_0 — простой элемент в K_0.

Рассмотрим эндоморфизм формальной группы F умножения на π_0:

$$[\pi_0]_F(X) = \pi_0 X + a_2\pi_0 X^2 + \ldots + a_{q^h} X^{q^h} + \ldots, \quad a_i \in \mathfrak{O}_K$$

и $a_{q^h} \in \mathfrak{O}_K^*$, так как высота F равна h. Все коэффициенты $a_i \in \pi_0\mathfrak{O}_K$, так как по условию $\mathfrak{O}_K/\mathfrak{O}_{K_0}$ — неразветвлено. По подготовительной лемме Вейерштрасса существует $\varepsilon(X) \in 1 + X\mathfrak{O}_{K_0}[|X|]$ такой, что

$$f(X) := \frac{[\pi_0](X)}{X}\varepsilon(X) =$$

$$= \pi_0 + \pi_0 c_1 X^1 + \ldots + \pi_0 c_{q^h-2} X^{q^h-2} + c_{q^h-1} X^{q^h-1},$$

где $c_{q^h-1} \in \mathfrak{O}_K^*$.
Ясно, что

$$\mathrm{Ker}[\pi_0]_F(X) = \mathrm{Ker}\, f(X)$$

Пусть π — корень многочлена $f(X)$ и соответственно, ненулевой корень $[\pi_0](X) = 0$, тогда расширение $K(\pi)/K$ — вполне разветвленное и π — простой элемент в нём. Поэтому в поле $K(\pi)$ имеем:

$$-\pi_0(1 + c_1\pi + \ldots + c_{q^h-2}\pi^{q^h-2}) = c_{q^h-1}\pi^{q^h-1},$$

откуда

$$-\pi_0 = c_{q^h-1}\pi^{q^h-1}\varepsilon,$$

где $\varepsilon = (1 + c_1\pi + \ldots + c_{q^h-2}\pi^{q^h-2})^{-1}$.
Пусть ε' — единица в $K(\pi)$ такая, что $(\varepsilon')^{q^h-1} = \varepsilon$, тогда $\pi' = \pi\varepsilon'$ будет корнем уравнения

$$X^{q^h-1} + \pi_0' = 0,$$

где $\pi_0' = \pi_0 c_{q^h-1}^{-1} \in K_0$. При этом

$$L(\mathrm{Ker}[\pi_0]_F) = L(\pi) = L(\pi'),$$

так как $\mathrm{Ker}[\pi_0]_F$ не принадлежит по условию полю L. Но $K \subset L$, а уравнение

$$c_{q^h-1}X^{q^h-1} + \pi_0(1 + c_1 X + \ldots + c_{q^h-2}X^{q^h-2}) = 0$$

равносильно уравнению

$$Y^{q^h-1} + \pi_0 c_{q^h-1}^{-1} = 0 \Leftrightarrow Y^{q^h-1} + \pi_0' = 0,$$

где
$$Y = X(1 + c_1 X + \ldots + c_{q^h-2} X^{q^h-2})^{-1}$$
Итак, мы доказали, что
$$L(\mathrm{Ker}[\pi_0]_F) = L(\pi'),$$
где π' — корень уравнения $X^{q^h-1} + \pi_0' = 0, \pi_0'$ — простой в K_0 (и в K).

1) Пусть индекс ветвления $e = e(L/K)$ делится на $q^h - 1$, то есть $e = (q^h - 1)e'$, и пусть Π — простой элемент в L. Тогда
$$-\pi_0' = \Pi^e \theta \eta,$$
где θ — представитель Тейхмюллера, а η — главная единица поля L. Тогда
$$\pi' = \sqrt[q^h-1]{-\pi_0'} = \Pi^{e'} \sqrt[q^h-1]{\theta} \eta_1,$$
где $\eta_1^{q^h-1} = \eta$ в L.
Поэтому расширение $L(\pi') = L(\sqrt[q^h-1]{\theta})$, а с ним и $L(\mathrm{Ker}[\pi_0]_F)$ неразветвлено над L. Это значит, что $F(\mathfrak{M}_L)$ не является вполне регулярным модулем.

2) Если же e не делится на $q^h - 1$, то расширение $L(\pi') = L(\sqrt[q^h-1]{\pi^e \theta})$ будет разветвлено над L, откуда $F(\mathfrak{M}_L)$ — вполне регулярный относительно группы F модуль. $\square$

4 Формальные модули в многомерных локальных полях

В этом разделе формальный модуль будет строиться только для формальной группы Хонды высоты h.
Пусть поле K — полное многомерное (n-мерное) поле нулевой характеристики, то есть поле, для которого имеется последовательность полей,
$$K_0, K_1, \ldots, K_{n-1}, K_n = K$$
таких, что K_0 — совершенное поле характеристики p, а K_{i-1} — поле вычетов для $K_i, 1 \le i \le n$.
В дальнейшем мы предполагаем, что последнее поле вычетов конечно. Также, следуя изложению работы [5], мы будем рассматривать только *стандартные* многомерные поля для интересующего нас разнохарактеристического случая n-мерного локального поля (то есть $char K = 0, char K_{n-1} = p > 0$). Последовательность полей тогда выглядит следующим образом:
$$\mathbb{F}_q - \mathbb{F}_q((t_1)) - \ldots - \mathbb{F}_q((t_1)) \ldots ((t_{n-1})) - k\{\{t_1\}\} \ldots \{\{t_{n-1}\}\} := K,$$
где k — конечное расширение поля $\mathbb{Q}_p$, а $q = \#\overline{k}$.

4.1 Случай двумерного локального поля для формальной группы Хонды

Чтобы не усложнять процедуру доказательства общей теоремы техническими выкладками, докажем её для двумерного поля

$$\mathbb{F}_p - \mathbb{F}_p((t_0)) - k\{\{t_0\}\} := K,$$

где k — конечное расширение $\mathbb{Q}_p$.
Пусть T — подполе инерции в k, $T' := T\{\{t_0\}\}, \mathfrak{O}_{T'}$– его кольцо целых относительно двумерного нормирования. Тогда имеем такую схему двумерных полей:

$$\begin{array}{ccccc}
\mathbb{Q}_p\{\{t_0\}\} & \longrightarrow & T\{\{t_0\}\} = T' & \longrightarrow & k\{\{t_0\}\} = K \\
\mathbb{Z}_p\{\{t_0\}\} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_{T'} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K \\
\{t_0, p\} & \longrightarrow & \{t_0, p\} & \longrightarrow & \{t_0, \pi\}
\end{array}$$

Определим формальнцую группу Хонды над $\mathfrak{O}_{T'}$. Для этого фиксируем эндоморфизм $\sigma : \mathfrak{O}_{T'} \to \mathfrak{O}_{T'}$, определенный следующим образом:

$$\sigma(\sum a_i t_0^i) = \sum a_i^{Fr} t_0^{p\cdot i},\ a_i \in \mathfrak{O}_T,$$

и обладающий свойством:

$$\forall x \in \mathfrak{O}_{T'} \quad \sigma(x) \equiv x^p \pmod{\mathfrak{M}_{T'}},$$

где Fr - продолжение автоморфизма Фробениуса на $T/\mathbb{Q}_p$.
Определим действие оператора Фробениуса на рядах из $O'_T[[X]]$ следующим образом:

$$\triangle(\sum b_i x^i) = \sum \sigma(b_i) x^{p\cdot i},\ b_i \in \mathfrak{O}_{T'}.$$

Множество операторов $\sum_{i\geq 0} b_i \triangle^i$, где $b_i \in \mathfrak{O}_{T'}$, образуют некоммутативное кольцо $\mathfrak{O}_{T'}[| \triangle |]$ формально степенных рядов от $\triangle$, для которого $\triangle b = \sigma(b)\triangle$ для $b \in \mathfrak{O}_{T'}$. Формальная группа Хонды над $\mathfrak{O}_{T'}$ с логарифмом $log_F(X) \in T'[|X|]$ задается также, как и в параграфе 3.3.
Пусть теперь $F(X,Y)$ — формальная группа Хонды над $\mathfrak{O}_{T'}$ высоты h, $\mathrm{End}_{\mathfrak{O}_K} F \cong \mathbb{Z}_p\{\{t_0\}\}$. Пусть поле L — расширение поля K такое, что $\mathrm{Ker}_F[p]$ (без нуля) не содержится в L, $e = e(L/T') = (e_1, e_2)$ — 2-мерный индекс ветвления, $\{T_0, \Pi\}$ - система локальных параметров поля L. Тогда T_0 и Π являются делителями t_0 и π соответственно. Диаграмма полей в этом случае выглядит так:

$$\begin{array}{ccccccc}
\mathbb{Q}_p\{\{t_0\}\} & \longrightarrow & T' & \longrightarrow & K & \longrightarrow & L \\
\mathbb{Z}_p\{\{t_0\}\} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_{T'} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K & \longrightarrow & \mathfrak{O}_L \\
\{t_0, p\} & \longrightarrow & \{t_0, p\} & \longrightarrow & \{t_0, \pi\} & \longrightarrow & \{T_0, \Pi\}
\end{array}$$

Теорема 4.1. Поле L (а значит и $F(\mathfrak{M}_L)$) являются вполне регулярными относительно формальной группы F тогда и только тогда, когда первый индекс e_1 в 2-мерном индексе ветвления $e = (e_1, e_2)$ расширения L/T' не делится на $p^h - 1$.

Доказательство. Из определения высоты формальной группы следует, что

$$[p]_F(X) \equiv cX^{p^h} \mod (\pi_0, deg(p^h + 1)), \quad c \in O^*_{T'},$$

при этом c является рядом

$$c = c_0 + c_1\pi + \ldots, \quad c_i \in \mathbb{Z}_p\{\{t_0\}\},\ c_0 \in \mathbb{Z}_p\{\{t_0\}\}^* \cap O^*_{T'},$$

то есть его коэффициенты сами являются рядами с коэффициентами из $\mathbb{Z}_p$. Однако обратимость c_0 в $O_{T'}$ выполнена только когда c_0 начинается со свободного коэффициента. Действительно, пусть

$$c_0 = a_m t^m + a_{m+1}t^{m+1} + \ldots,\ m \in \mathbb{Z}, a_i \in \mathbb{Z}_p, a_m \in \mathbb{Z}^*_p$$

Пусть $a'_{m+k} = \dfrac{a_{m+k}}{a_m}$. Тогда

$$c_0 = a_m t^m (1 + a'_{m+1}t^{m+1} + \ldots),$$

откуда

$$c_0^{-1} = a_m^{-1}t^{-m}(1 + a'_{m+1}t^{m+1} + \ldots)^{-1}.$$

Этот ряд лежит в $\mathbb{Z}_p\{\{t_0\}\}^*$, но не лежит в $O^*_{T'}$ и даже $O_{T'}$, поскольку

$$O_K = \{\alpha | \upsilon_K(\alpha) \geq (0,0)\},$$

а $\upsilon_K(t^{-m}) = (-m, 0) < (0,0)$. Таким образом, $m = 0$ и тогда

$$c = (\theta_{0,0}+\theta_{0,1}t+\ldots)+(\theta_{1,0}t^{-m_1}+\ldots)\pi+(\theta_{2,0}t^{-m_2}+\ldots)\pi^2+\ldots,$$

где $\theta_{0,0} \in \mathbb{Z}^*_p, \theta_{i,j} \in \mathbb{Z}_p$.
Далее действуем аналогично случаю одномерного поля. Переобозначим для удобства $K_0 := \mathbb{Q}_p\{\{t_0\}\}$.

По подготовительной лемме Вейерштрасса существует $\varepsilon(X) \in 1 + X\mathfrak{O}_{K_0}[|X|]$ такой, что

$$\frac{([p](X))}{X} \cdot \varepsilon(X) = f(X) = p + pd_1X^1 + \ldots + pd_{p^h-2}X^{p^h-2} + d_{p^h-1}X^{p^h-1},$$

где $d_{p^h-1} := d_{p^h-1}(X) \in \mathfrak{O}^*_{T'}$.
Ясно, что

$$\mathrm{Ker}[p]_F(X) = \mathrm{Ker}\, f(X).$$

Далее, сводим присоединение корня π многочлена $f(X)$ к присоединению корня π' уравнения $X^{p^h-1} + p' = 0$, то есть имеем

$$L(\mathrm{Ker}[p]_F) = L(\pi'),$$

где $p' = p \cdot d^{-1}_{p^h-1}$ - простой в K_0.

1) Пусть первый индекс e_1 в двумерном индексе ветвления $(e_1, e_2) = e = e(L/T') = e(L/K_0)$ делится на $p^h - 1$, то есть $e_1 = (p^h - 1)e'$, и пусть Π — простой элемент в L. Тогда

$$-p' = \Pi^e \theta \eta,$$

где θ — представитель Тейхмюллера, а η — главная единица поля L. Тогда

$$\pi' = \sqrt[p^h-1]{-p'} = \Pi^{e'} \sqrt[p^h-1]{\theta} \eta_1,$$

где $\eta_1^{p^h-1} = \eta$ в L.
Поэтому расширение $L(\pi') = L(\sqrt[p^h-1]{\theta})$, а с ним и $L(\mathrm{Ker}[p]_F)$ неразветвлено над L. Это значит, что $F(\mathfrak{M}_L)$ не является вполне регулярным модулем.

2) Если же e_1 не делится на $p^h - 1$, то расширение $L(\pi') = L(\sqrt[p^h-1]{\pi^e \theta})$ будет разветвлено над L, откуда $F(\mathfrak{M}_L)$ — вполне регулярный модуль. $\square$

4.2 Случай многомерного локального поля для формальной группы Хонды

В этом параграфе мы сформулируем общий результат для многомерных локальных полей без доказательства, чтобы не загружать работу техническими выкладками. Идейно оно ничем не отличается от двумерного случая.
Пусть k — конечное расширение $\mathbb{Q}_p$, T — подполе инерции в k. Рассмотрим стандартное n-мерное локальное поле K:

$$\mathbb{F}_q - \mathbb{F}_q((t_1)) - \ldots - \mathbb{F}_q((t_1)) \ldots ((t_{n-1})) - k\{\{t_1\}\} \ldots \{\{t_{n-1}\}\} := K.$$

Переобозначим для удобства $\mathbb{Q}_p' := \mathbb{Q}_p\{\{t_1\}\} \ldots \{\{t_{n-1}\}\}$, $T' := T\{\{t_1\}\} \ldots \{\{t_{n-1}\}\}, \mathbb{Z}_p' := \mathbb{Z}_p\{\{t_1\}\} \ldots \{\{t_{n-1}\}\}$.
Фиксируем эндоморфизм $\sigma : \mathfrak{O}_{T'} \to \mathfrak{O}_{T'}$, определенный следующим образом:

$$\sigma(\sum a_i t_1^{i_1} \ldots t_{n-1}^{i_{n-1}}) = \sum a_i^{Fr} t_1^{p \cdot i_1} \ldots t_{n-1}^{p \cdot i_{n-1}},\ a_i \in \mathfrak{O}_T,$$

и обладающий свойством:

$$\forall x \in \mathfrak{O}_{T'} \quad \sigma(x) \equiv x^p \pmod{\mathfrak{M}_{T'}},$$

где Fr - продолжение автоморфизма Фробениуса на $T/\mathbb{Q}_p$.
Оператор Фробениуса и формальную группу Хонды определим также, как и в двумерном случае. Рассмотрим формальную группу Хонды $F(X, Y)$ над $\mathfrak{O}_{T'}$ высоты h, $\mathrm{End}_{\mathfrak{O}_K} F \cong \mathbb{Z}_p'$. Пусть L — расширение поля K такое, что $\mathrm{Ker}_F[p]$ (без нуля) не содержится в L, $e = e(L/T') = (e_1, e_2, \ldots, e_n)$ — n-мерный индекс ветвления,$\mathfrak{M}_L$ — максимальный идеал кольца целых поля L, $F(\mathfrak{M}_L)$ — формальный $\mathfrak{O}_L$−модуль на идеале $\mathfrak{M}_L$.

Пусть $\{T_1, \ldots, T_{n-1}, T_n = \Pi\}$ — система локальных параметров поля L.

Диаграмма полей будет иметь следующий вид:

$$\begin{array}{ccccccc}
\mathbb{Q}_p' & \longrightarrow & T' & \longrightarrow & K & \longrightarrow & L \\
\mathbb{Z}_p' & \longrightarrow & \mathfrak{O}_{T'} & \longrightarrow & \mathfrak{O}_K & \longrightarrow & \mathfrak{O}_L \\
\{t_1, \ldots, t_{n-1}, p\} & \longrightarrow & - & \longrightarrow & \{t_1, \ldots, t_{n-1}, \pi\} & \longrightarrow & \{T_1, \ldots, T_{n-1}, \Pi\}
\end{array}$$

Теорема 4.2. Поле L (а значит и $F(\mathfrak{M}_L)$) являются вполне регулярными относительно формальной группы F тогда и только тогда, когда первый индекс e_1 в n-мерном индексе ветвления $e = (e_1, \ldots, e_n)$ расширения L/T' не делится на $p^h - 1$.

Заключение

Фактически исследование регулярных формальных модулей до этого было выполнено только для случая мультипликативной формальной группы одномерного локального поля в работе З.И. Боревича. В работе сделан следующий шаг к обобщению результатов – получены свойства для случая многочленной формальной группы, для формальной группы Любина-Тейта и формальной группы Хонды.

Также сделан первый шаг к изучению свойств регулярных формальных модулей в случае многомерных локальных полей. Исследован наиболее сложный и интересный случай так называемых стандартных многомерных локальных полей, введенных в работе И.Б. Жукова. В работе получены свойства регулярных формальных модулей для формальной группы Хонды, представляющую опять же более сложный случай, чем другие формальные группы.

Список литературы

[1] Fesenko I.B., Vostokov S.V, *Local Fields and Their Extensions*, Second edition, 2002.

[2] Востоков С.В, Волков П.П., Пак Г.К, *Символ Гильберта для многочленных формальных групп*, Зап. науч. сем. ПОМИ, том 400, 2012, стр. 127-132.

[3] Боревич З.И., *О регулярных локальных полях*, Вестник ЛГУ, 1962, стр. 142-145.

[4] Бенуа Д.Г., Востоков С.В. *Арифметика группы точек формальной группы*, Зап. научн. сем. ЛОМИ, 191 (1991), стр. 9–23.

[5] Zhukov I. B., *Higher dimensional local fields*, Invitation to higher local fields, 2000, стр. 5-18.

[6] Honda T., *On the theory of commutative formal groups*, J. Math Soc. Japan, 1970, стр. 213-246.

[7] Hazewinkel M., *Formal groups and applications*, Academic Press, New York, 1978.