

## Расчёт выходного тока канала МКП

Каждый канал пластины является усилителем входного тока канала. Ток на выходе канала определяется по формуле:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} * M,$$

где  $I_{\text{вых}}$  – ток на выходе канала;  $I_{\text{вх}}$  – ток на входе канала;  $M$  – коэффициент усиления.

Для нахождения коэффициента усиления можно использовать формулу, полученную для «шаговой» модели канала:

$$M = \left[ \frac{AU^2}{\frac{2\pi}{3} \bar{u}_0 \gamma_k^2} \right]^{\frac{\frac{2\pi}{3} \bar{u}_0 \gamma_k^2}{U}},$$

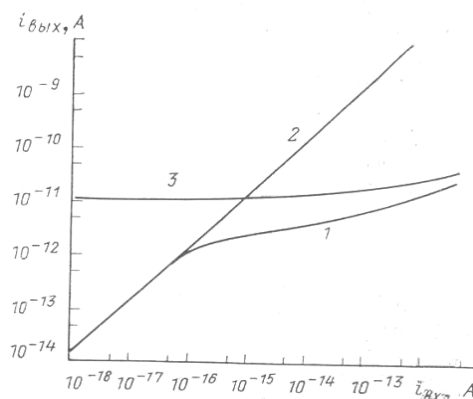
где  $A$  – коэффициент пропорциональности в выражении для коэффициента вторичной эмиссии  $\sigma = A\epsilon_e$ , где  $\epsilon_e$  – энергия первичного электрона;  $U$  – напряжение, поданное на МКП;  $\bar{u}_0$  – средняя энергия вторичных электронов,  $\gamma_k$  – калибр канала ( $1/d$ ).

**(Максимальное усиление достигается при  $U_{\text{МКП}}/\gamma_k = 22\text{В}$ )**

Для более точного вычисления выходного тока необходимы компьютерные вычисления с использованием методов Монте-Карло.

**Формула (модель) используется только в режиме малых токов (режим одиночных импульсов), когда поле в канале постоянно.**

В непрерывном (токовом) режиме ток на выходе МКП линейно нарастает с ростом тока на входе до тех пор, пока электронный ток на выходе не достигнет примерно 10% от величины тока проводимости. После этого наступает насыщение и усиление снижается до величин, близких к единице. Не ярко выраженный характер насыщения объясняется тем, что падение усиления связано со снижением напряженности поля на выходе канала. Поэтому к его начальному участку прикладывается большее напряжение и ток проводимости при насыщении повышается. В связи с этим величина выходного тока несколько повышается, следуя за повышением тока проводимости.



1 – в непрерывном режиме; 2 – в режиме редких одиночных импульсов; 3 – зависимость тока проводимости от выходного тока

**Зависимость величины выходного электронного тока от величины входного электронного тока для МКП**

## Математическая модель режима усиления постоянного тока в канале микроканальной пластины

Для расчетов в широком диапазоне входных токов (в постоянном и импульсном режимах) предложена следующая модель, базирующаяся на теории электрических цепей. Канал рассматривается как однородная одномерная активная среда. Каждый участок между столкновениями электрона заменяется эквивалентной электрической схемой, приведенной на рисунке. Коэффициент усиления тока в линейном режиме считается известным.

Электрическое поле в канале МКП складывается из стороннего поля с напряженностью  $E_0$ , образованного источником приложенного к МКП постоянного напряжения  $U_0$  и наведенного поля  $E_{in}$ , обусловленного протеканием наведенного тока по резистивному слою канала. Наведенное поле можно выразить через вторично-эмиссионный конвекционный ток, воспользовавшись эквивалентной схемой канала, изображенной на рисунке, в виде цепочки источников тока и резистивных элементов.

Элементы цепочки источников тока отображают участок канала длиной  $dz$ :  $I(z)$  есть усредненный на  $dz$  конвекционный ток,  $r' = R/L$  — погонное сопротивление,  $R$  — сопротивление резистивного слоя МКП, приходящееся на один канал,  $L$  — длина канала. Канал при этом рассматривается как одномерная активная среда с распределенным вдоль  $z$  усилением. Считается известным коэффициент усиления тока в линейном режиме  $M_0$  и ток источника постоянного напряжения  $U_0$ , приходящийся на один канал, при нулевом

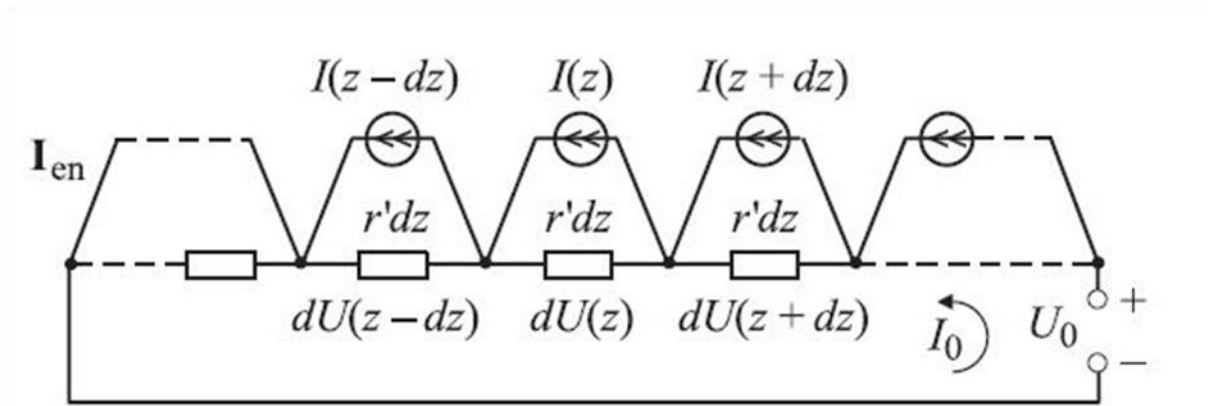


Рисунок 3.1 — Эквивалентная схема канала МКП

токе на входе канала —  $I_s = U_0/R$ .

Если известен закон распределения тока по длине канала  $I(z)$ , то соответствующее распределение приращение потенциала  $dU(z)$  в канале может быть получено из уравнений контурных токов. Для контуров с контурными токами  $I(z)$  и  $I_0$ , можно записать:

$$[I_0 - I(z)]r'dz = dU(z), \quad I_0 r' L - \int_0^L I(z) r' dz = U_0. \quad (3.1)$$

Исключив из этих уравнений контурный ток  $I_0$ , получим,

$$dU(z) = \frac{U_0}{L} dz + \frac{dz}{L} \int_0^L I(z) r' dz - I(z) r' dz, \quad (3.2)$$

или, переходя к напряженности поля,

$$E(z) = \frac{dU}{dz} = E_0 + E_{in} = E_0 + \frac{r'}{L} \int_0^L I(z) dz - I(z)r'. \quad (3.3)$$

Свяжем далее наведенное поле  $E_{in}$  с конвекционным током в канале. Известно, что при малой величине входного тока в линейном режиме напряженность электрического поля постоянна ( $E(z) = E_0$ ,  $E_{in} = 0$ ), а конвекционный ток вдоль оси  $z$  канала распределен по закону:

$$I(z) = I_{en} e^{\alpha z}, \quad (3.4)$$

где  $\alpha = \ln(M_0)/L$  — инкремент, определяющий величину погонного усиления тока. С увеличением входного тока распределение напряженности электрического поля в канале изменится за счет наведенного поля, а распределение тока отклоняется от экспоненты. Для корректировки тока воспользуемся формулой:

$$I(z) = I_{en} e^{\alpha z} \frac{E(z)}{E_0}. \quad (3.5)$$

Подставим выражение (3.5) в уравнение (3.3) и перегруппируем его члены:

$$E(z) + I_{en} e^{\alpha z} \frac{E(z)}{E_0} r' = E_0 + \frac{r'}{L} \int_0^L I_{en} e^{\alpha z} \frac{E(z)}{E_0} dz. \quad (3.6)$$

Продифференцировав последнее равенство, в котором правая часть не зависит от координаты  $z$ , получим линейное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{dE}{dz} + \frac{I_{en} r'}{E_0} e^{\alpha z} \left( \frac{dE}{dz} + \alpha E \right) = 0. \quad (3.7)$$

Решением этого уравнения с учетом граничного условия  $\int_0^L E(z) dz = U_0$  дает распределение напряженности поля:

$$E(z) = \frac{E_0 \ln M_0}{F \left( 1 + \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} \right)}, \quad (3.8)$$

где,

$$F = \ln M_0 + \ln \left( 1 + \frac{I_{en}}{I_s} \right) - \ln \left( 1 + \frac{I_{en}}{I_s} M_0 \right). \quad (3.9)$$

Подстановка (3.8) в (3.5) дает распределение тока:

$$I(z) = I_{en} e^{\alpha z} \frac{E_0 \ln M_0}{F \left( 1 + \frac{I_{en}}{I_s} e^{\alpha z} \right)}, \quad (3.10)$$

а при  $z = L$  из (3.10) следует формула коэффициента усиления канала:

$$M = \frac{I(L)}{I_{en}} = M_0 \frac{\ln M_0}{F \left( 1 + \frac{I_{en}}{I_s} M_0 \right)}. \quad (3.11)$$

## Расчет режима электронной тренировки МКП

Задача разработки режима электронной тренировки МКП заключается в определении таких параметров как входной ток, ускоряющее напряжение катод-МКП, напряжение МКП.

В качестве характеристики отвечающей за степень тренировки канала МКП был введен такой параметр как эффективность. **Эффективность электронной тренировки определяется как произведение количества электронов, проходящих через канал на их энергию.** Энергия электрона равна произведению расстояния между двумя соударениями электрона на напряженность поля.

Эти параметры зависят от входного тока и напряжения на МКП в связи с существующим эффектом насыщения усиления МКП. Таким образом, для расчета эффективности электронной тренировки необходимо знать распределение тока и напряженности электрического поля в канале МКП от задаваемых параметров — входного тока и напряжения на МКП.

### Эффективность электронной тренировки канала МКП

Эффективность электронной тренировки зависит от:

- количества электронов, прошедших через канал МКП;
- энергии прошедших электронов.

Количество электронов, прошедших через канал МКП — это ток  $I(z)$ , распределение которого вдоль оси  $z$  в выбранной модели определяются по формуле (3.10). Энергия электронов определяется через произведение —  $\varepsilon(z) = E(z) \cdot l(z)$ , где  $E(z)$  — напряженность электрического поля, определяется по формуле (3.8), а  $l(z)$  расстояние, которое проходит вторичный электрон от появления в канале до первого соударения.

Исходя из всего этого, эффективность электронной тренировки определяется формулой:

$$F(z) = I(z)E(z)l(z). \quad (3.12)$$

Длина пролета вторичного электрона  $l$  тоже зависит от координаты  $z$  и определяется как:

$$l = \frac{U_0 d_k^2}{4L\bar{u}_0} = \frac{U_0 d_k}{4\gamma_k \bar{u}_0}, \quad (3.13)$$

где  $U_0$  — напряжение на МКП,  $d_k$  — диаметр канала,  $L$  — длина канала,  $\bar{u}_0 = 2\text{эВ}$  — средняя начальная энергия электрона  $\gamma_k$  — калибр канала.

Однако данная формула справедлива только для линейного режима работы МКП, когда напряженность электрического поля является однородным, и в линейном режиме длина пробега электрона в канале постоянна и не зависит от координаты  $z$ . В процессе тренировки, МКП чаще всего будет находиться в нелинейном режиме работы, это связано с большими входными токами (десятки и сотни наноампер), поэтому электрическое поле уже не будет однородным по длине канала, а значит, длина пробега будет меняться в зависимости от координаты  $z$ . Данный факт требуется учитывать при расчете эффективности электронной тренировки.

**Входными параметрами в расчетной модели являются:**

$U_0$  — напряжение источника питания МКП;

$I_{in}$  — входной ток на канал МКП;

$R_{MCP}$  — сопротивление канала МКП;

$d_k$  — диаметр канала МКП;

$L_k$  — длина канала МКП.

При вводе параметра  $L_k$  учитывалась не физическая длина канала МКП, которая равна толщине микроканальной пластины, а только та часть канала, где происходит процесс умножения электронов. В эту длину не входит металлизация, образовавшаяся внутри канала при нанесении на торец МКП низкоомного материала. На входе канала эта металлизация доходит до глубины одного диаметра МКП, а на выходе до двух диаметров. Также необходимо учитывать, что электроны попадают в канал не с самого его начала, то есть первый удар приходится на определенную глубину. Учитывая эти особенности, получаем, что длина канала на 4 диаметра МКП меньше толщины микроканальной пластины.

Такие параметры как сопротивление, длина и диаметр канала МКП являются постоянными параметрами и задаются лишь один раз. И для исследуемой МКП принимают следующие значения:  $R_{MCP} = 120 \cdot 10^6$  Ом,  $d_k = 6 \cdot 10^{-6}$  м,  $L_k = 426 \cdot 10^{-6}$  м.

Выбранная математическая модель режима усиления постоянного тока в канале микроканальной пластины для расчетов требует коэффициент усиления МКП в линейном режиме  $M_0$ , который зависит от приложенного напряжения на МКП. Для этого устанавливался, при каком значении входного тока можно считать, что МКП работает в линейном режиме.

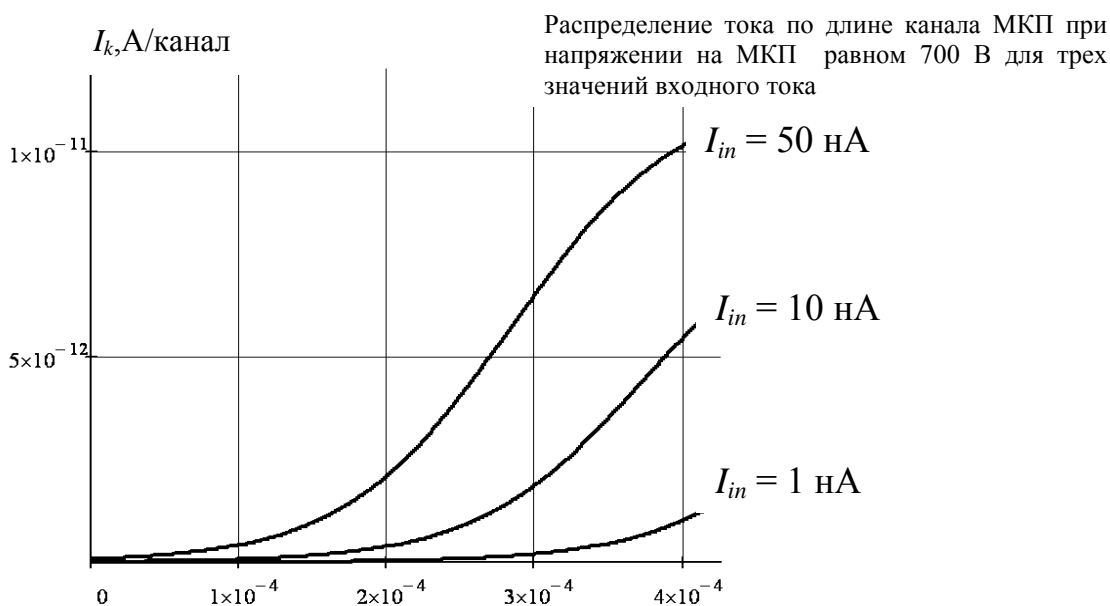
Таблица — Экспериментальные значения **коэффициента усиления в линейном режиме** работы от напряжение на МКП (**входной ток МКП равен 1 нА**)

Напряжение на МКП, В	Коэффициент усиления	Напряжение на МКП, В	Коэффициент усиления
1000	3270	700	340
950	2690	650	180
900	1850	600	77
850	1760	550	27
800	1240	500	12
750	746	450	5

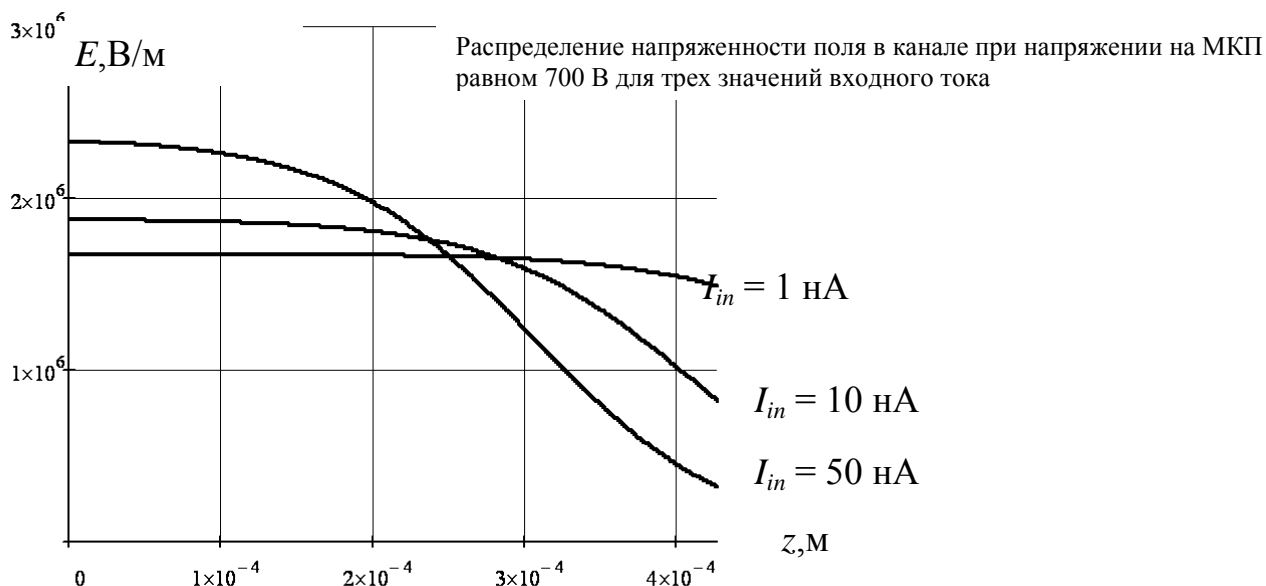
## Распределение тока и напряженности электрического поля в канале

Процесс тренировки зависит от входного тока  $I_{in}$  и напряжения на МКП  $U_0$ . Изменение этих параметров приводит к изменению распределения тока и напряженности поля в канале МКП.

При увеличении входного тока распределение тока в канале изменяется. При входном токе равным 5 нА, зависимость имела экспоненциальный характер, а при входном токе равным 50 нА ток в канале отклоняется от экспоненциальной зависимости и в выходной части можно наблюдать эффект насыщения тока.



Распределение напряженности электрического поля в канале при входном токе 5 нА однородно на длине в три четверти канала. При увеличении входного тока неоднородность электрического поля резко усиливается. При входном токе в 50 нА напряженность на входе почти в 10 раз больше чем на выходе канала. Это обусловлено низкой проводимостью резистивного слоя канала, и как следствие, недостаточной компенсацией положительного заряда, образовавшегося на поверхности канала под действием вторичной эмиссии.



## Влияние напряжения катод-МКП на распределение тока в канале

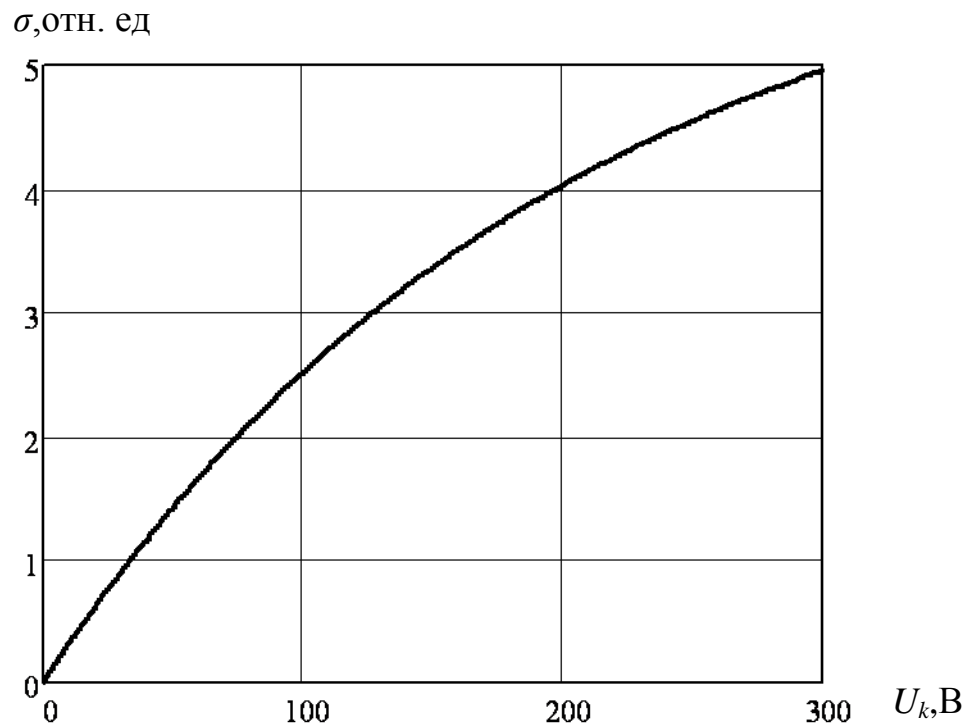
Напряжение катод-МКП определяет энергию первичных электронов, попадающих в канал МКП. Попадая в канал, первичный электрон ударяется о стенку канала, выбивая при этом из тонкого эмиссионного слоя МКП вторичные электроны. Количество вторичных электронов при первом ударе зависит от энергии первичного электрона и определяется коэффициентом вторичной электронной эмиссии. Коэффициент вторичной электронной эмиссии из стенки канала микроканальной пластины зависит от энергии падающей частицы и от угла падения относительно поверхности канала. Таким образом, после первого удара ток в канале будет равняться  $I_{\text{in}} \cdot \sigma$ , где  $\sigma$  — коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ):

$$\sigma = \sigma_{\text{max}} \cdot \frac{4 \cdot x}{(x + 1)^2} \cdot e^{0.5(1 - \sin \gamma)}, \quad (3.14)$$

где

$$x = \frac{U_1}{U_{1\text{max}}} \cdot \sqrt{\sin \gamma}. \quad (3.15)$$

Здесь  $\sigma$  — коэффициент вторичной эмиссии,  $\sigma_{\text{max}}=4$  — максимальный коэффициент вторичной эмиссии,  $\gamma$  — угол падения относительно поверхности канала,  $U_1$  — энергия падающего электрона,  $U_{1\text{max}}$  — максимальная энергия падающего электрона.



Зависимость КВЭЭ от ускоряющего напряжения катод-МКП при угле падения 5 градусов

Изменяя значения ускоряющего напряжения катод-МКП можно влиять на процесс усиления в МКП.. Здесь входной ток — 1 нА, напряжение на МКП — 800 В. При ускоряющем напряжении равном 300 В, при прочих равных условиях, выходной ток в полтора раза больше, чем при ускоряющем напряжении равном 100 В.

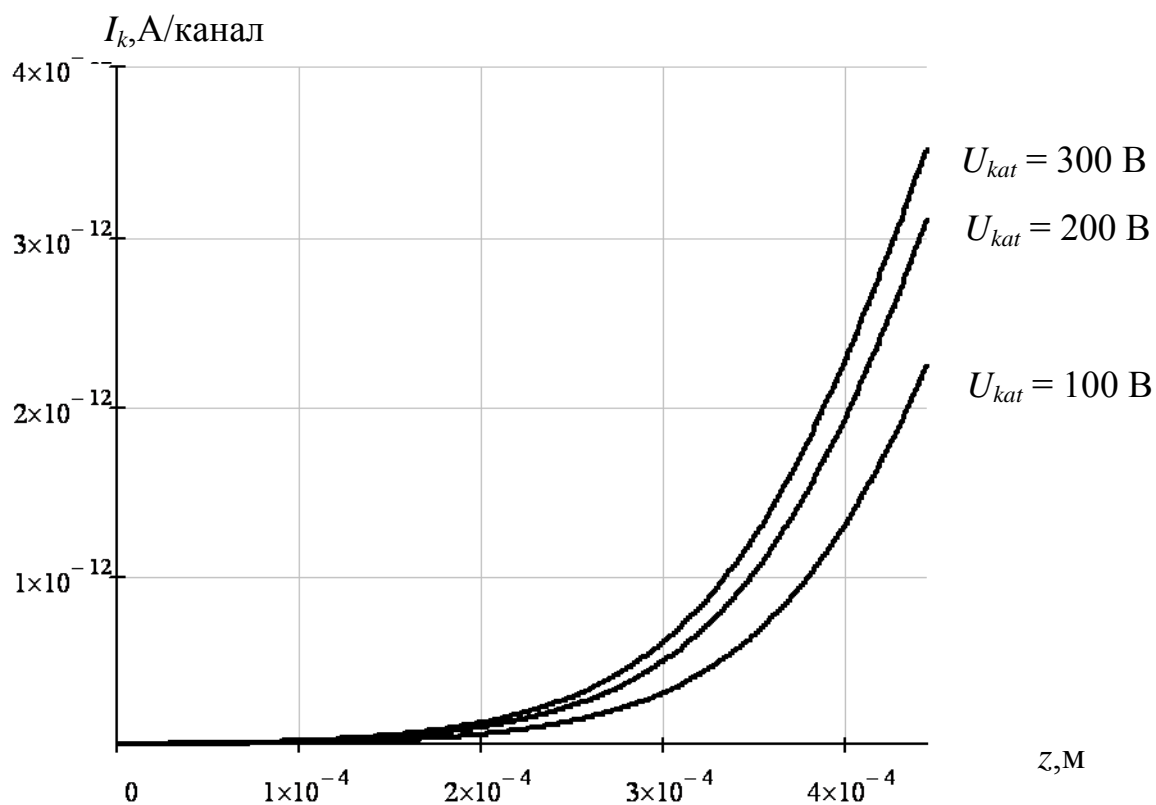


Рисунок. Влияние ускоряющего напряжение на распределение тока в канале МКП



### Расчет длины пролета вторичного электрона в канале МКП

Для расчета длины пролета вторичного электрона в расчетной модели были сделаны некоторые допущения. Канал МКП делился на шесть равных частей, на каждой из которых напряженность электрического поля считалась однородной и равной по значению средней напряженности на данном участке. На каждом участке рассчитывалась своя длина пролета вторичного электрона по формуле (3.13). Затем производится аппроксимация полученных значений полиномом третьей степени. Аппроксимированные функции используются в расчетах эффективности электронной тренировки в качестве зависимости длины пролета вторичного электрона от координаты  $z$ , рисунок 3.7

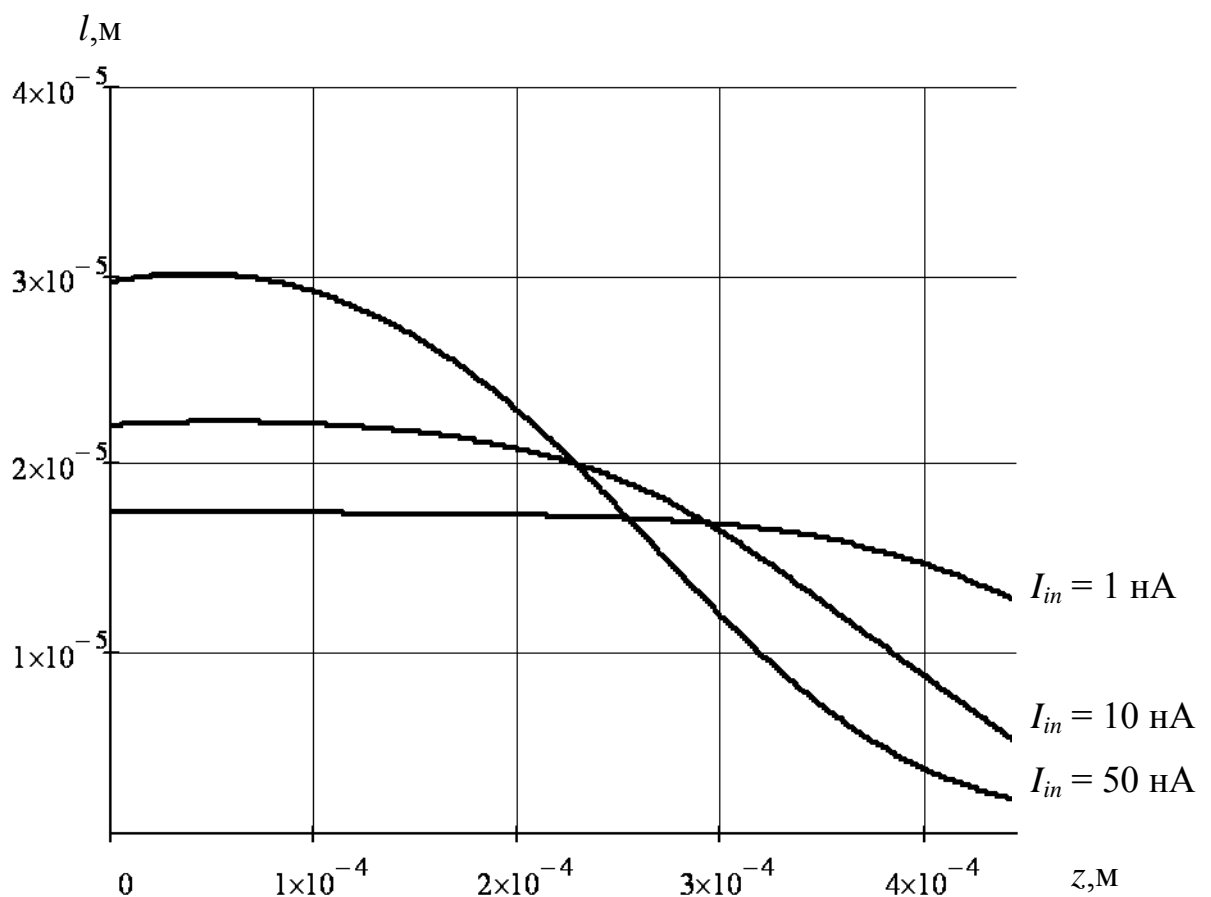


Рисунок 3.7 — Зависимость длины пролета вторичного электрона от координаты  $z$  для трех значений входного тока

## Расчет эффективности электронной тренировки

Имея распределение тока, напряженности электрического поля в канале МКП и зависимость длины пролета вторичного электрона от координаты  $z$ , можно рассчитать распределение эффективности электронной тренировки МКП по длине канала пользуясь формулой (3.12).

Изменение параметров электронной тренировки приведет изменению распределения эффективности тренировки канала. Варьируя эти параметры можно добиться равномерной тренировки всей длины канала. На рисунке 3.8 изображено распределение эффективности электронной тренировки при входном токе равным 55 нА и не высоком напряжении на МКП равным 650 В.

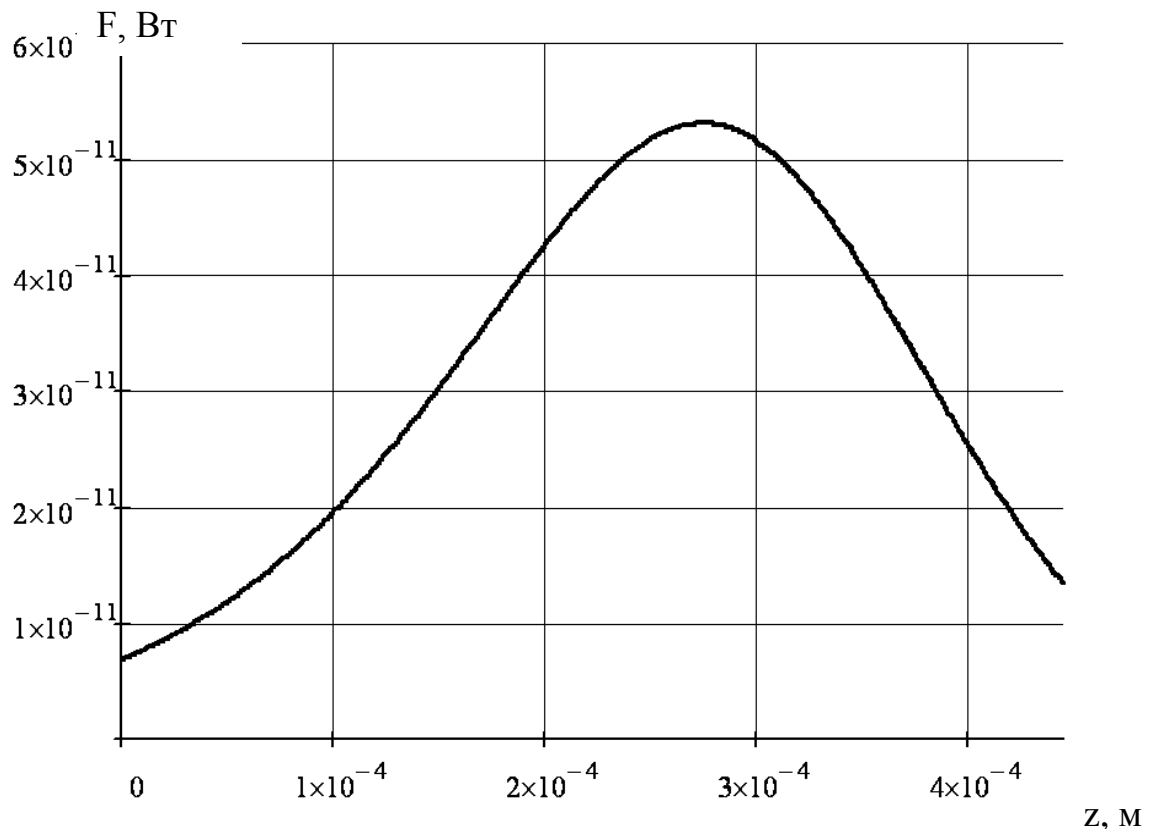


Рисунок 3.8 — Распределение эффективности электронной тренировки по длине канала при низком входном токе и высоком напряжении на МКП

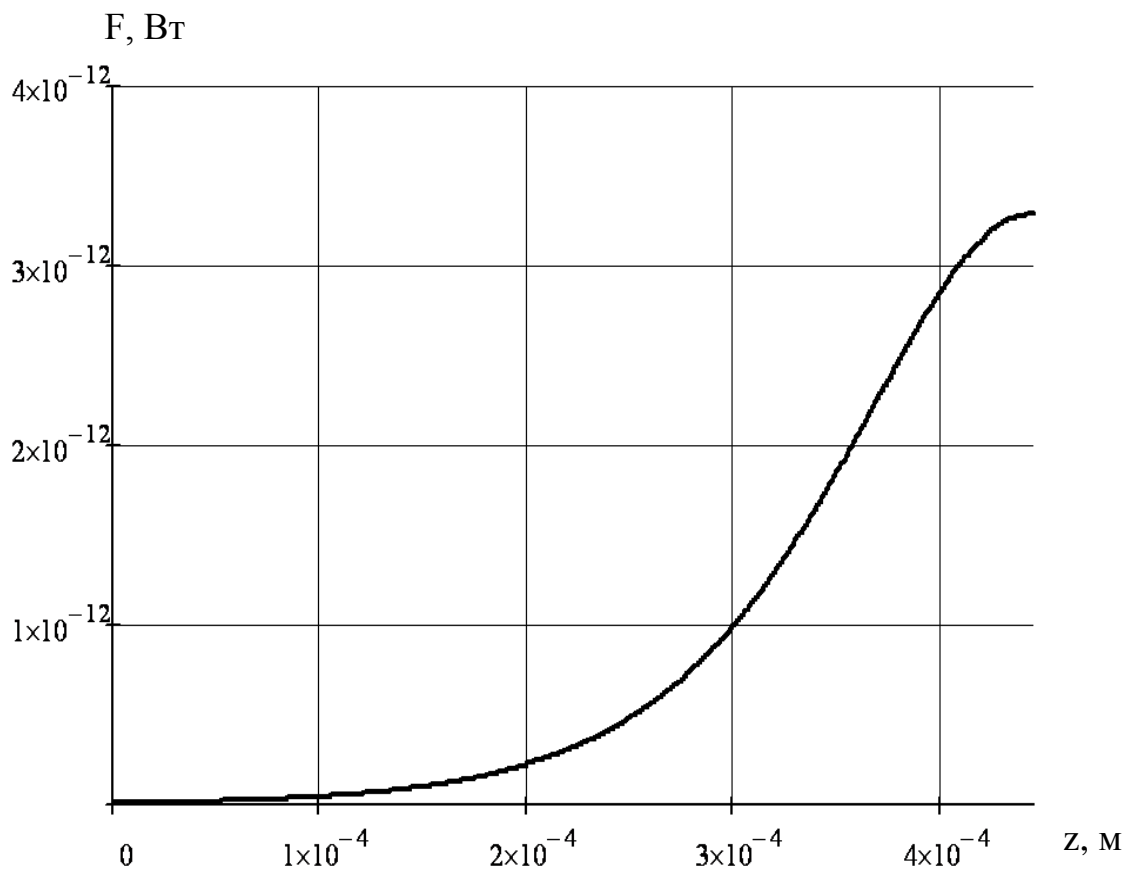


Рисунок 3.10 — Распределение эффективности электронной тренировки по длине канала при низком входном токе и высоком напряжении на МКП

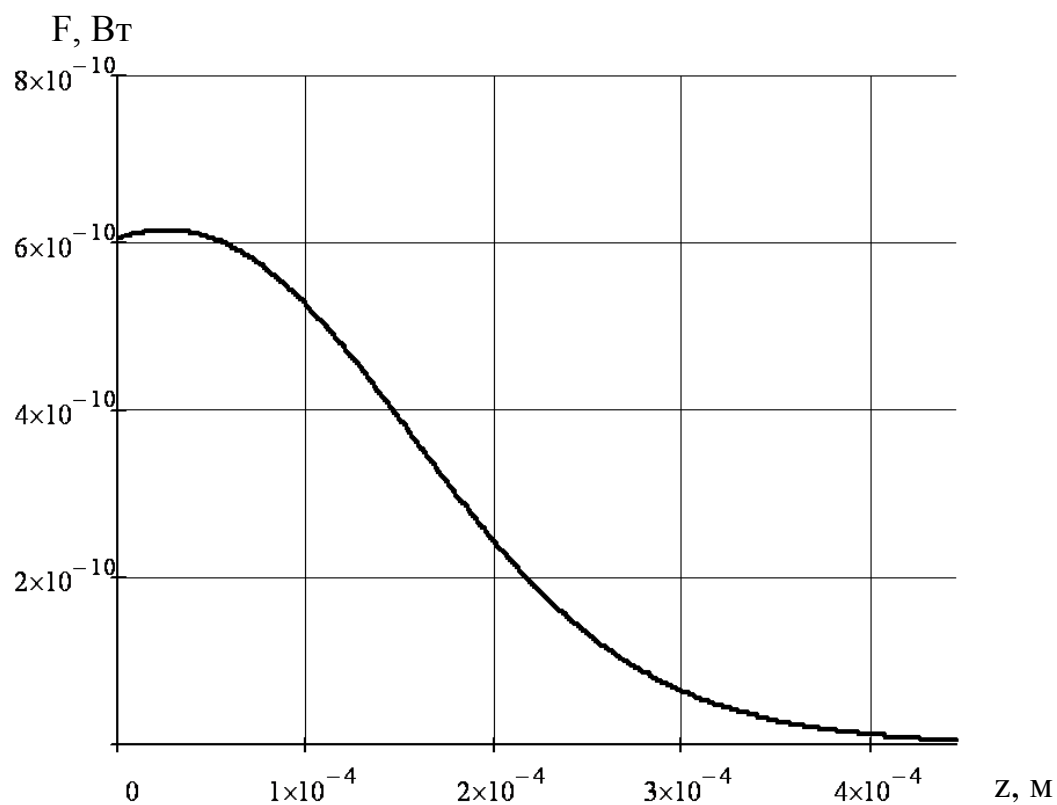
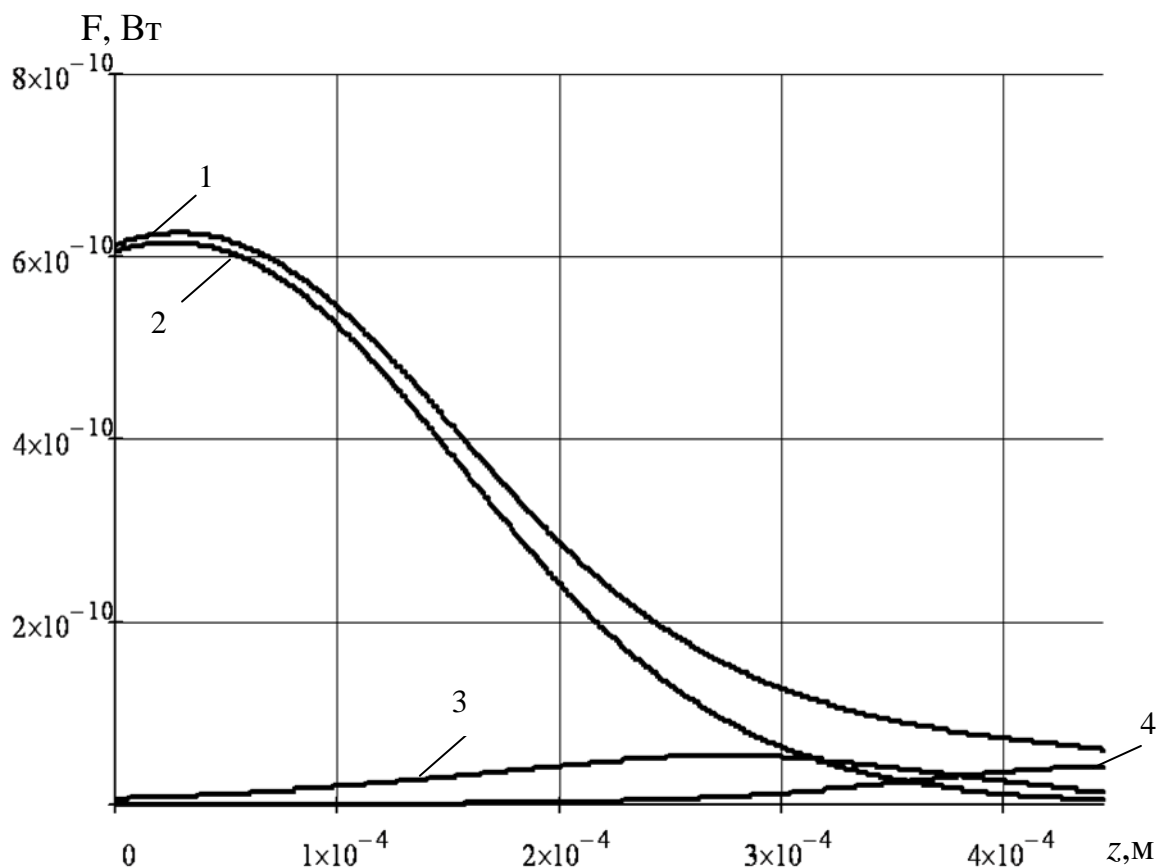


Рисунок 3.9 — Распределение эффективности электронной тренировки по длине канала при высоком входном токе и низком напряжении на МКП

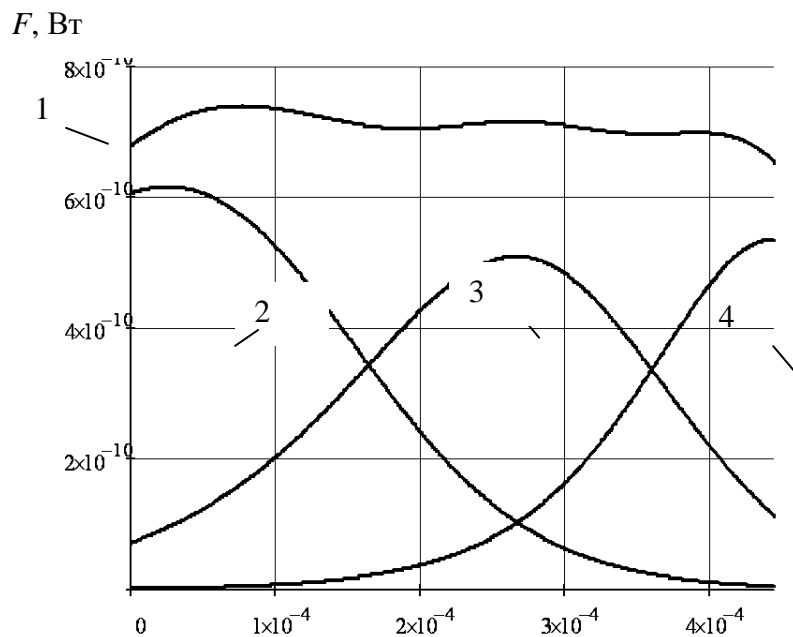
Однако если производить последовательно тренировку МКП по этим трем режимам, обеспечив тем самым тренировку сначала входной части, затем центральной и выходной, можно обеспечить достаточно равномерную тренировку. При последовательном проведении трех рассчитанных режимов одинаковое количество времени суммарная эффективность тренировки будет



1 — суммарная эффективность тренировки; 2 — эффективность тренировки режима «вход»; 3 — эффективность тренировки режима «центр»; 4 — эффективность тренировки режима «выход».

Рисунок 3.11 — Суммарное распределение эффективности электронной тренировки по длине канала при последовательном проведении рассчитанных режимов.

иметь распределение, показанное на рисунке 3.11.



1 — суммарная эффективность тренировки; 2 — эффективность тренировки режима «выход»; 3 — эффективность тренировки режима «центр»; 4 — эффективность тренировки режима «вход».

Рисунок 3.12 — Суммарное распределение эффективности электронной тренировки по длине канала при последовательном проведении рассчитанных режимов с учетом времени проведения каждого режима.

За счет большого тока и высокой напряженности поля на входе режим «вход» эффективнее режимов «центр» и выход почти на порядок. Поэтому если проводить тренировку по рассчитанным трем режимам, то суммарная эффективность тренировки всего канала будет сильно смещена к входу канала. Для выравнивания значения эффективности тренировки по всей длине увеличим время проведения режима «центр» в 9 раз, а режима «выход» в 13 раз. Увеличение времени проведения отдельных режимов увеличит значения эффективности для каждого режима, и в сумме общая эффективность по всей длине канала будет равномерной, рисунок 3.12.

Таким образом, получен режим электронной тренировки, который состоит из трех этапов, последовательное проведение которых приводит к равномерной тренировке канала МКП по всей длине. Время проведения этапов сформированного режима определяется из пропорционального соотношения 1:9:13 для этапов «вход», «центр» и «выход» соответственно. Параметры тренировки для каждого этапа приведены в таблице

Название этапа	Входной ток, нА	Ускоряющее напряжение, В	Напряжение на МКП, В	Время проведения этапа, отн. ед.
Вход	800	100	600	1
Центр	55	200	650	9
Выход	1	300	800	13

## Расчет времени проведения этапов электронной тренировки

Время проведения этапов электронной тренировки рассчитанного режима соотносятся между собой как соотношение 1:9:13. Это значит, что конкретное время определяется в зависимости от необходимой зарядовой нагрузки. То есть полученный в данной работе режим, можно считать универсальным по параметру время проведения.

Зарядовая нагрузка — это отношение тока, пройденного через канал на этапе тренировки ко времени проведения тренировки, измеряется в кулонах (Кл/см<sup>2</sup>). Известно что стадия электронного обезгаживания заканчивается при достижении зарядовой нагрузки порядка 0,1 Кл/см<sup>2</sup>. Рассчитаем, за какое время при использовании рассчитанного режима будет обеспечена зарядовую нагрузку равную 0,1 Кл/см<sup>2</sup>. Исследуемая МКП имеет плотность каналов 10<sup>-6</sup> см<sup>-2</sup>, значит, в пересчете на один канал требуется обеспечить зарядовую нагрузку равную 10<sup>-7</sup> Кл/канал. Зарядовая нагрузка  $g = I \cdot t$ , где  $I$  — пройденный через канал ток,  $t$  — время проведения тренировки. Суммарный ток, проходящий через канал за весь режим, равен  $3,62 \cdot 10^{-12}$  А/канал. При данном входном токе общее время тренировки будет равным 27565 с. Учитывая пропорциональное отношение времени проведения каждого этапа  $t_1:t_2:t_3 = 1:9:13$ , получаем время этапа «вход»  $t_1 = 1252$  с, время этапа «центр»  $t_2 = 11268$  с, а время этапа «выход»  $t_3 = 16276$  с. Или в минутах — 21 мин, 187 мин, 272 мин для каждого этапа тренировки соответственно.