

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Исследование дипольно-связанных спиновых волн в системе  
латеральных структур**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 Радиоп физика

факультета нелинейных процессов

Русинова Кирилла Андреевича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

А.В. Садовников

Заведующий кафедрой

чл.-корр. РАН, профессор

Д.И. Трубецков

Саратов 2018 год

## Введение

Развитие магнонных микро- и наноразмерных элементов за последнее десятилетие приводит к созданию функциональных устройств для применения в плоских магнониках[1-4]. Волноводные магнитные полосы используются для управления спиновыми волнами на микро- и наномасштабе из-за возможности управления дисперсией как центрального, так и краевого режимов[5-8]. Уникальные особенности магнитных материалов обеспечивают парадигму технологии обработки сигналов, основанной на распространении спиновых волн. Идея, основанная на контроле за интерференцией спиновых волн, открывает перспективы для спин-волновой логической архитектуры. Как и с концепцией градуированного индексного подхода для магнонов, дипольная связь может влиять на характеристики спиновых волн, и поэтому направленный ответитель для применения в магнониках может быть изготовлен с использованием связанных магнитных полос. В частности, латерально связанные ограниченные магнитные полосы могут быть предложены в качестве альтернативного подхода к методам частотной фильтрации, которые реализуются с использованием искусственных магнитных материалов - магнонных кристаллов, которые выступают в качестве фильтрующих элементов частоты в магнонных сетях.

При выполнении данной работы планируется проведение моделирования поведения системы двух латерально связанных волноводов. Для них будут построены зависимости дисперсионных характеристик от геометрических параметров системы, а также вычислена и построена длина связи спиновых волн в системе волноводных плёнок.

## Влияние величины промежутка и толщины волноводов на дисперсию

При выполнении работы была численно смоделирована система из двух латерально связанных ЖИГ волноводов. Вычисления проводились с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Далее для них были построены графики дисперсии. Для этого во вкладке “Параметры” менялись значения параметров частоты сигнала и ширины щели между волноводами. После была построена зависимость волновых чисел от частоты при определённых величинах зазоров между волноводами. Как видно из нижеприведённых рисунков (рис.1 – 5) на графиках представлены симметричные и антисимметричные моды, при увеличении щели происходит их постепенное сужение. Это связано с тем, что при стремлении расстояния между двумя волноводами к нулю симметричная мода будет стремиться к моде волновода удвоенной ширины (400 мкм), но если расстояние между волноводами будет стремиться к бесконечности, то симметричная и антисимметричная будут стягиваться к моде волновода шириной 200 мкм, то есть такой же ширины, как и у одиночного волновода данной системы. Таким образом связь между волноводами увеличивается.

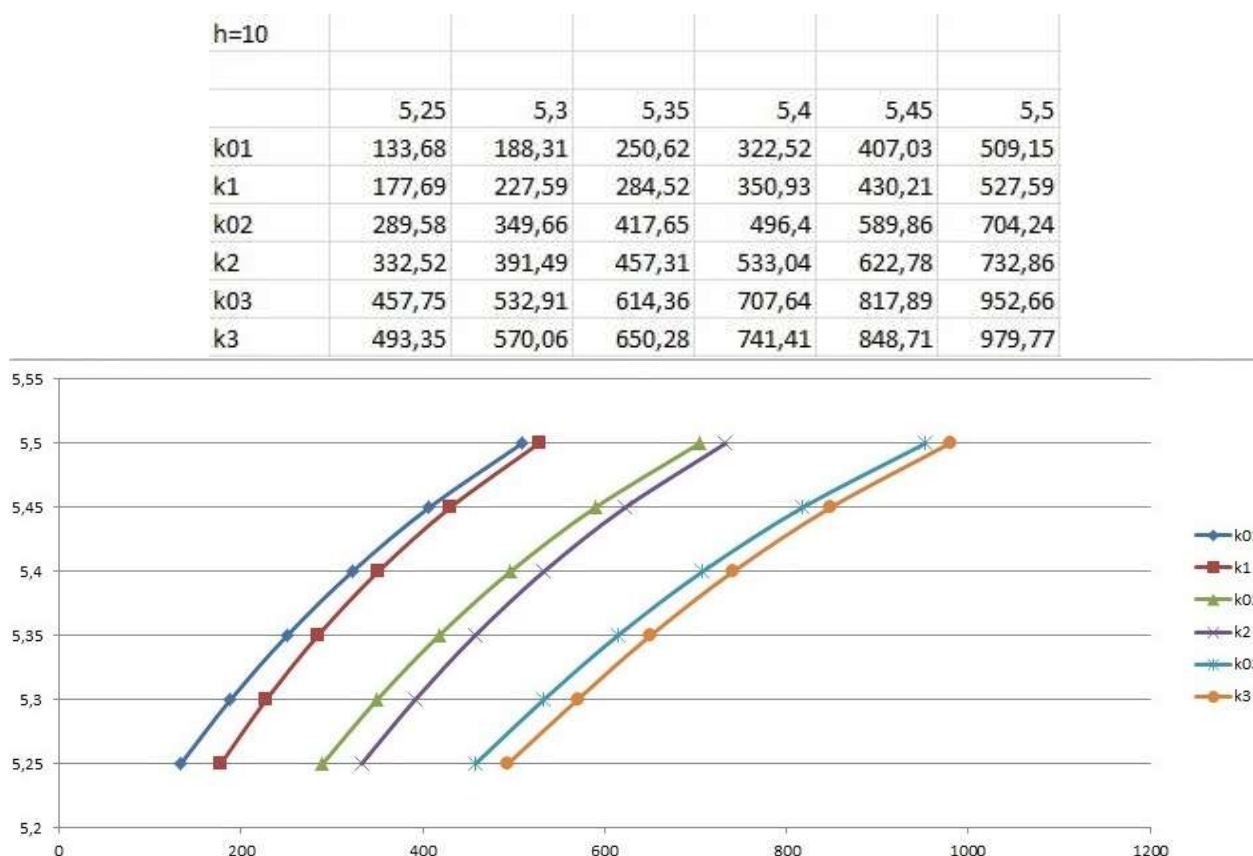


Рис.1 – Дисперсионная характеристика при ширине щели h=10 мкм

h=20						
	5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01	142,19	197,7	260,17	331,61	415,22	516,2
k1	175,03	224,85	281,74	348,18	427,52	524,99
k02	300,57	361,79	430,47	509,38	602,43	715,83
k2	327,27	385,99	451,63	527,25	616,94	727,05
k03	468,67	545,24	627,23	720,56	830,32	963,99
k3	487,04	562,9	642,86	733,87	841,16	972,32

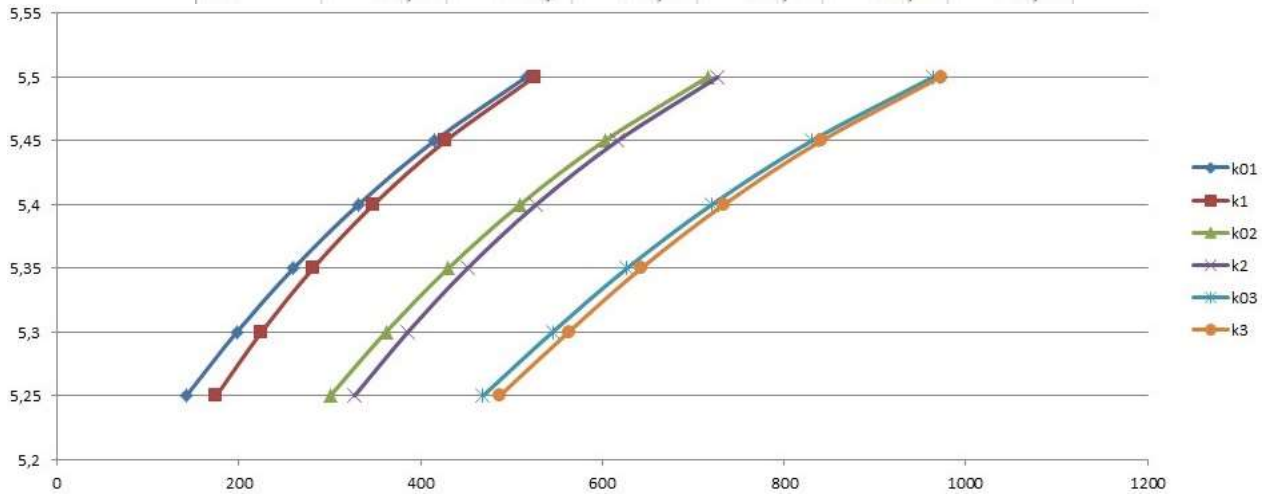


Рис.2 – Дисперсионная характеристика при ширине щели h=20 мкм

h=30						
	5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01	147,3	202,85	264,91	335,69	418,54	518,77
k1	172,83	222,65	279,61	346,17	425,7	523,4
k02	306,23	367,54	436	514,44	606,83	719,46
k2	323,62	382,32	448,05	523,84	613,79	724,26
k03	473,38	550,13	631,86	724,75	833,91	966,9
k3	483,38	559,03	639,13	730,38	838,03	969,68

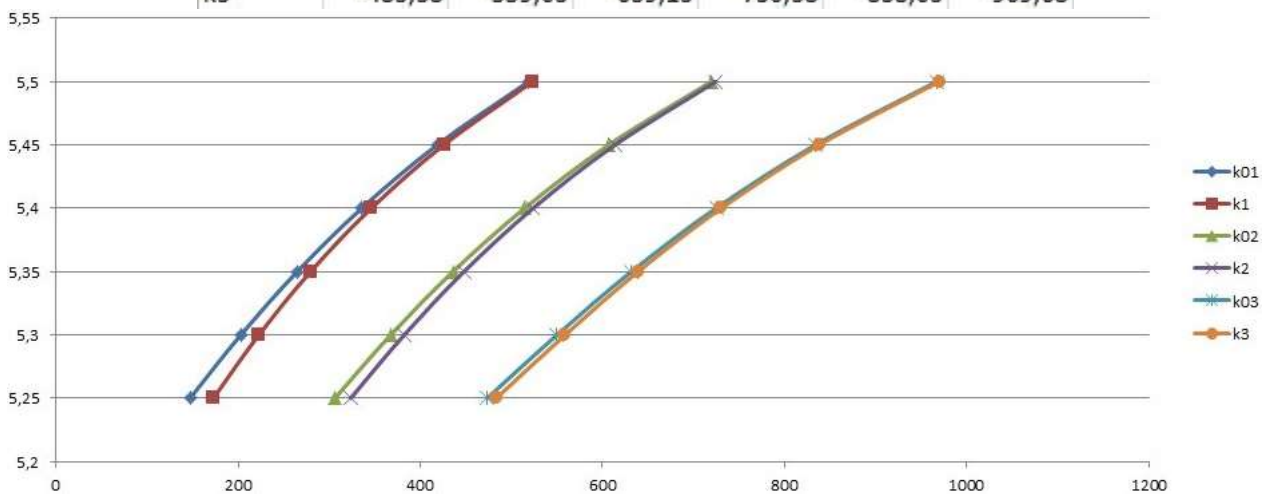


Рис.3 – Дисперсионная характеристика при ширине щели h=30 мкм

h=40						
	5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01	150,82	206,13	267,7	337,92	420,22	519,96
k1	171,02	220,91	278,01	344,76	424,52	522,47
k02	309,56	370,69	438,82	516,83	608,73	720,84
k2	321,14	379,95	445,87	521,92	612,16	722,96
k03	475,74	552,39	633,84	726,36	835,12	967,66
k3	481,33	557	637,31	728,81	836,73	968,63

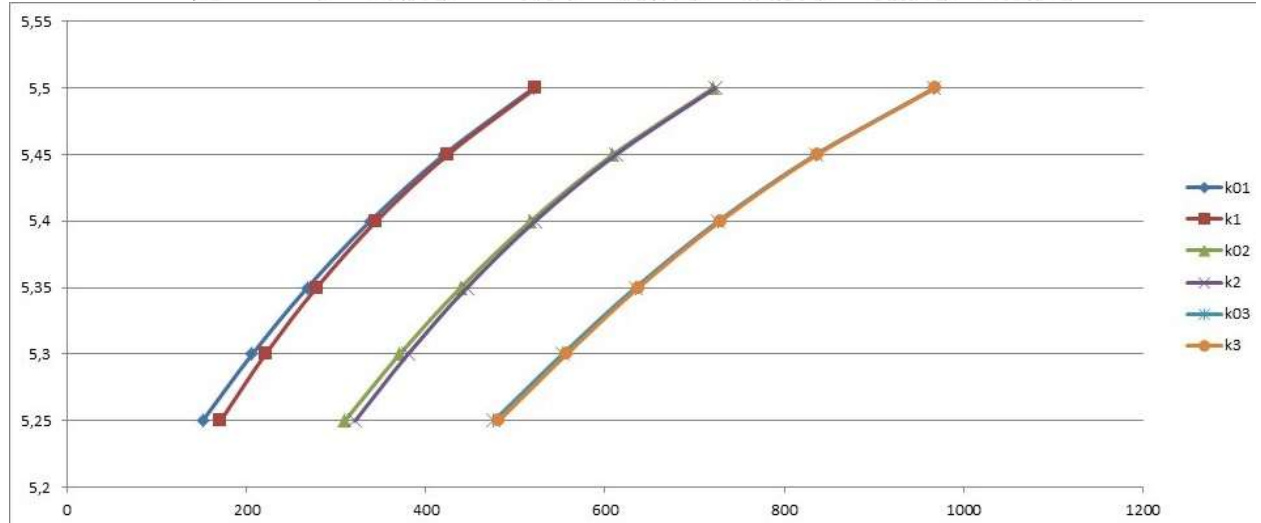


Рис.4 – Дисперсионная характеристика при ширине щели h=40 мкм

h=50						
	5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01	153,36	208,35	269,48	339,25	421,15	520,57
k1	169,54	219,55	276,83	343,8	423,78	521,96
k02	311,65	372,56	440,38	518,07	609,66	721,49
k2	319,48	378,45	444,58	520,87	611,38	722,44
k03	477,04	553,58	634,82	727,13	835,71	968,11
k3	480,22	556,01	636,51	728,22	836,36	968,48

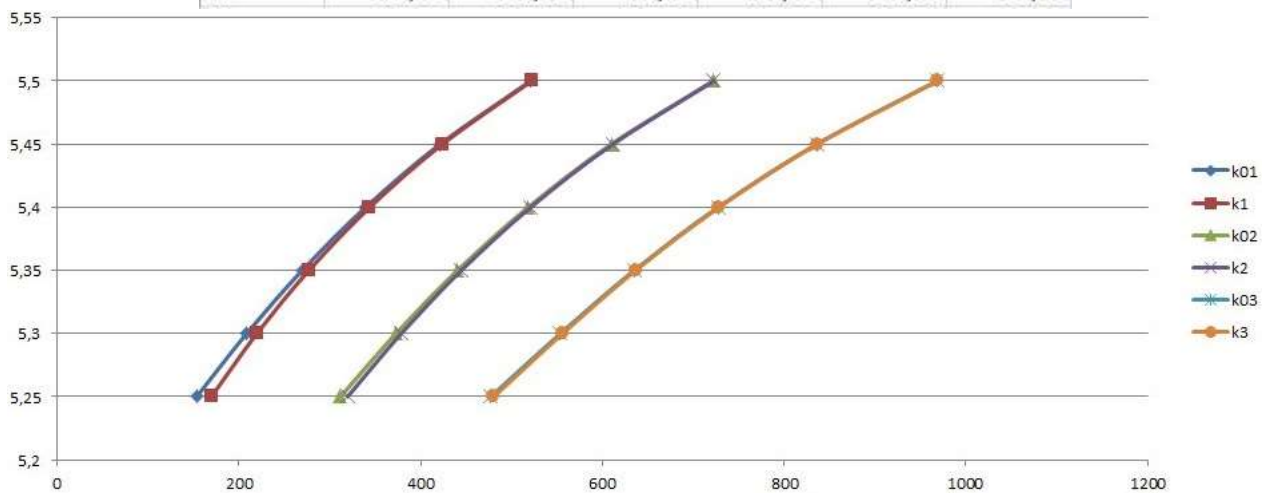


Рис.5 – Дисперсионная характеристика при ширине щели h=50 мкм

Далее была исследована зависимость дисперсионных характеристик от толщины волноводных плёнок. На рис.6 – 9 видно, что при увеличении данного параметра, происходит отталкивание мод друг от друга, и как следствие уменьшение связи между волноводами.

t=5	h=40					
	5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01	213,82	315,87	431,47	565,48	724,28	917,62
k1	225,64	321,85	434,28	566,71	724,78	917,8
k02	357,35	459,06	574,27	707,99	867,12	1062,2
k2	365,13	463,91	577,02	709,41	867,77	1062,5
k03	514,03	622,83	744,94	885,83	1053	1257,9
k3	518,2	625,53	746,54	886,69	1053,4	1258,1

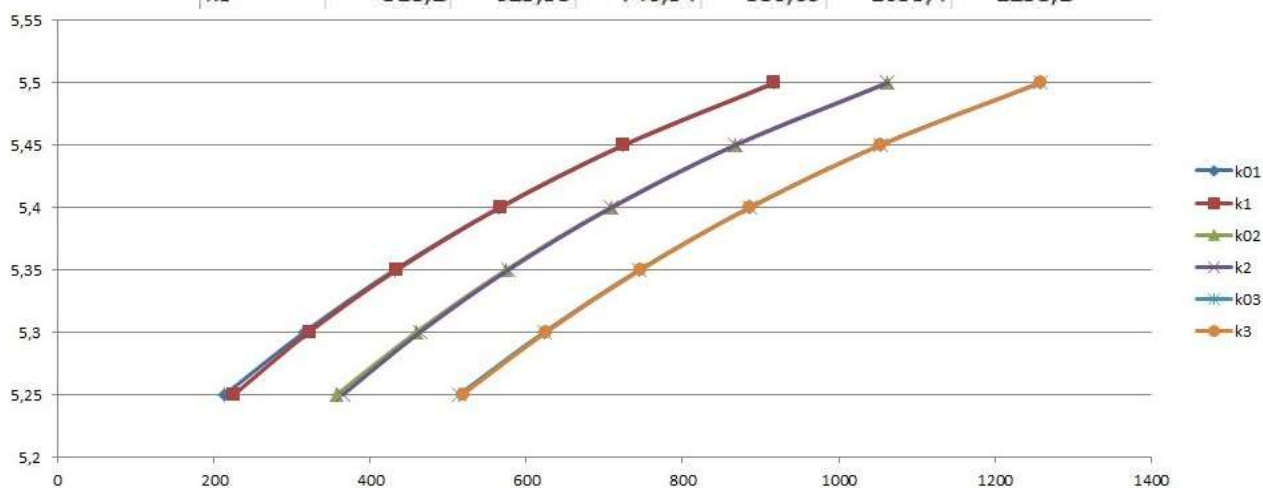


Рис.6 – Дисперсионная характеристика при толщине волноводов  $t=5$  мкм

h=40							
		5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01		150,82	206,13	267,7	337,92	420,22	519,96
k1		171,02	220,91	278,01	344,76	424,52	522,47
k02		309,56	370,69	438,82	516,83	608,73	720,84
k2		321,14	379,95	445,87	521,92	612,16	722,96
k03		475,74	552,39	633,84	726,36	835,12	967,66
k3		481,33	557	637,31	728,81	836,73	968,63

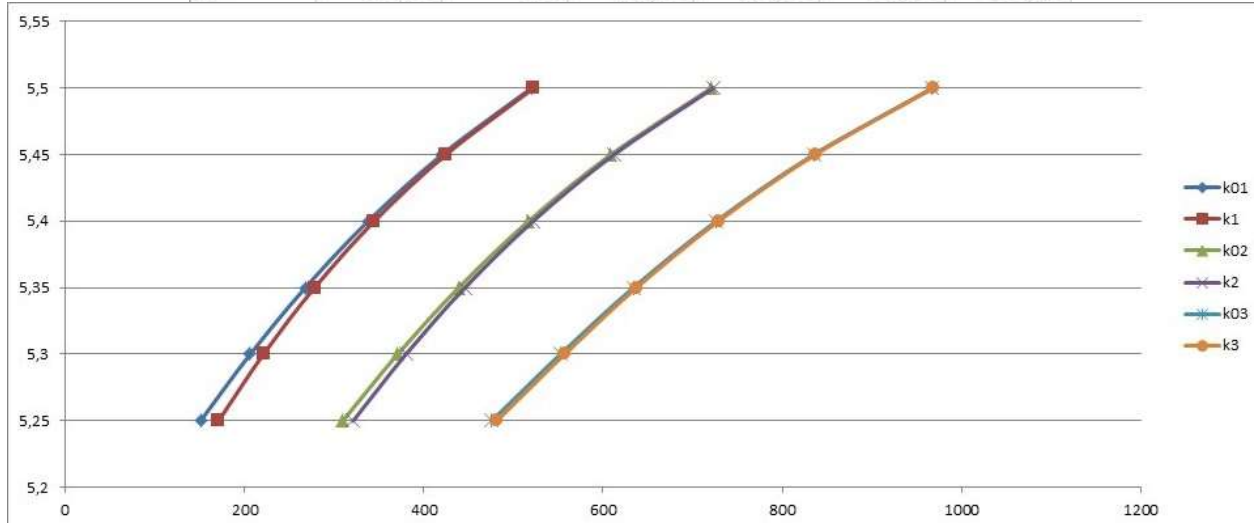


Рис.7 – Дисперсионная характеристика при толщине волноводов  $t=10$  мкм

t=15	h=40						
		5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01		129,43	169,59	214,26	265,01	324,19	395,56
k1		154,46	190,3	230,8	277,74	333,59	402,15
k02		297,07	346,54	401,24	463,69	537,16	626,71
k2		310,79	358,44	411,14	471,58	543,13	630,92
k03		374,77	519,04	600,32	681,31	773,54	882,95
k3		375,53	523,08	604,62	684,72	776,21	885,54

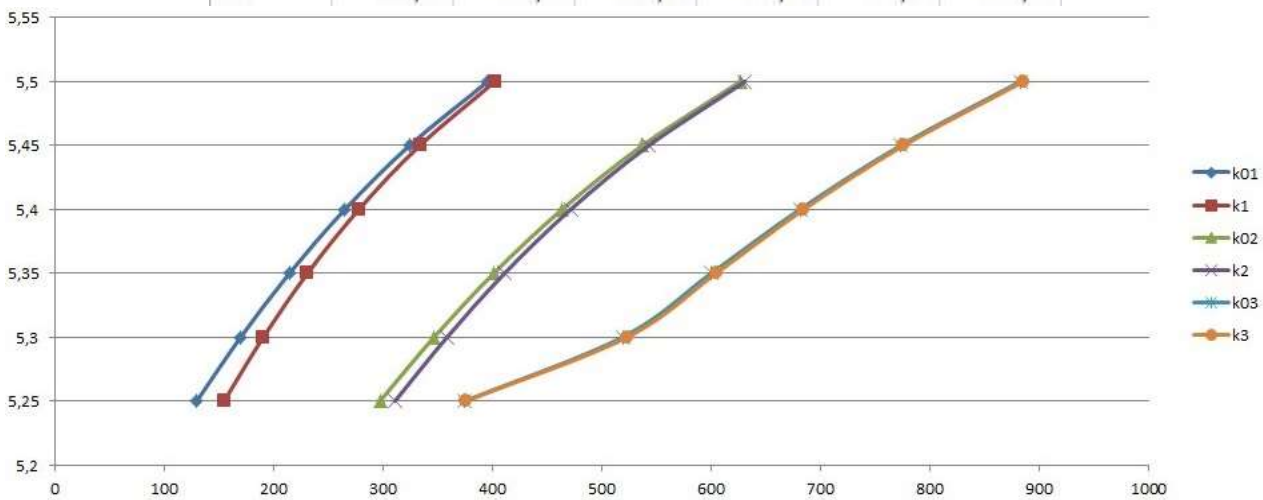


Рис.8 – Дисперсионная характеристика при толщине волноводов  $t=15$  мкм

t=20	h=40					
	5,25	5,3	5,35	5,4	5,45	5,5
k01	118,44	151,12	187,61	229,16	277,64	336,16
k1	147	176,26	209,09	246,97	291,93	347,13
k02	285,87	335,19	384,76	440,72	506,29	585,84
k2	296,15	348,4	396,4	450,45	514,02	591,59
k03	325,11	465,57	578,72	657,9	741,49	837,21
k3	329,97	466,18	581,05	661,3	744,57	840,54

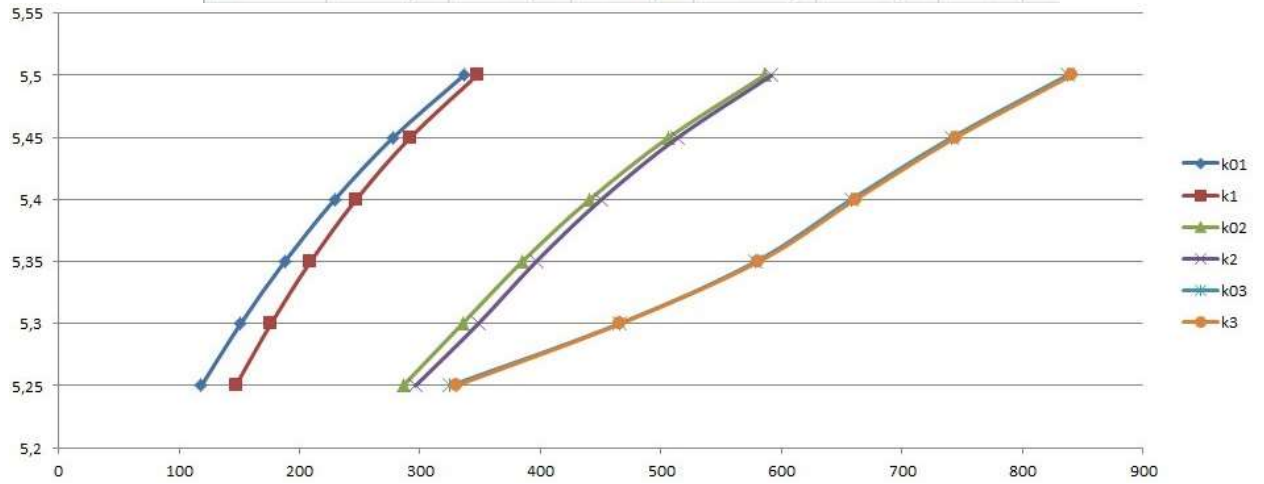


Рис.9 – Дисперсионная характеристика при толщине волноводов  $t=20$  мкм



## Зависимость длины связи от параметров системы

Для более точного описания системы из двух связанных волноводов были вычислены и построены зависимости длины связи  $L$  от двух геометрических параметров – ширины щели и толщины волноводов. Расчёт производился по формуле

$$L = \frac{\pi}{|k_1 - k_{01}|},$$

где  $L$  – длина связи между волноводами (период перекачки энергии),  $k_{01}$  – волновое число для симметричной моды,  $k_1$  – волновое число для антисимметричной моды. Вычисления производились при помощи уже полученных дисперсионных характеристик при определённых значениях частот.

Как видно из полученных графиков (рис.10, 11), при увеличении зазора между волноводами происходит увеличение длины связи и перекачиваемой между волноводами мощности. И напротив при изменении толщины волноводов в большую сторону, она уменьшается.

h	k1-k01	L
10	39,28	0,08
20	27,15	0,116
30	19,8	0,159
40	14,78	0,212
50	11,2	0,28

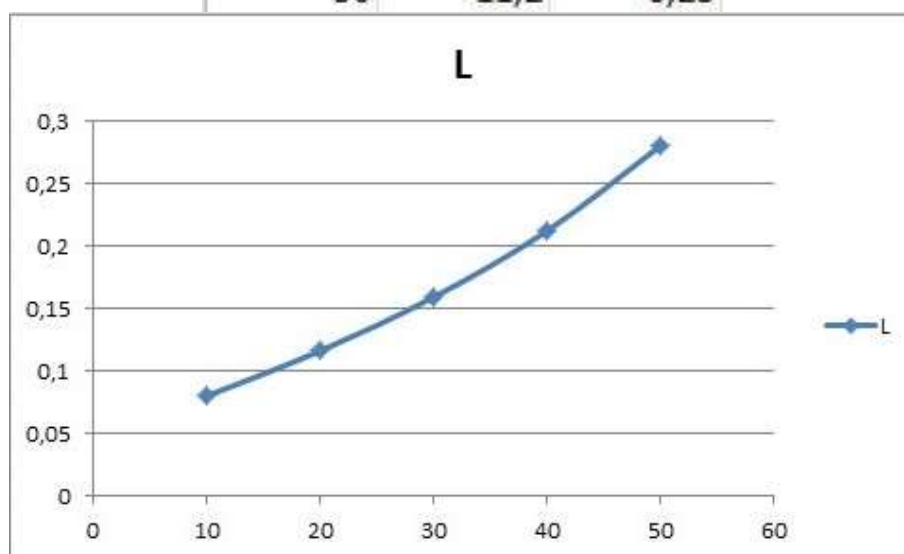


Рис.10 – Зависимость длины связи  $L$  от ширины щели между волноводами

t	k1-k01	L
5	5,98	0,525
10	14,78	0,212
15	20,71	0,152
20	25,14	0,125

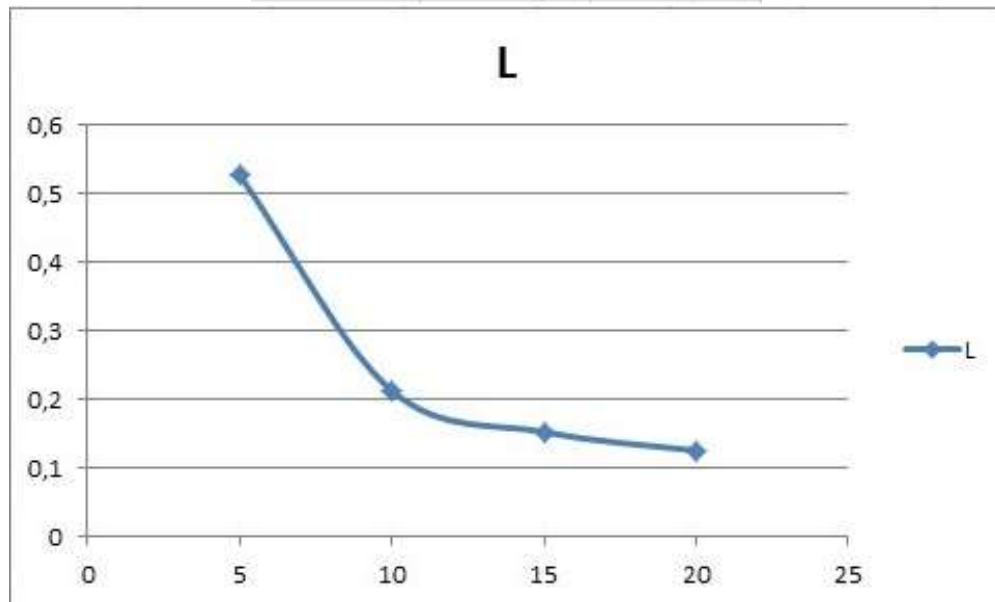


Рис.11 – Зависимость длины связи  $L$  от толщины волноводов

## **Заключение**

Из-за развития магнонных микро- и наноразмерных элементов за последнее десятилетие, которые привели к созданию новых функциональных устройств для применения в плоских магнониках, требуются всё новые численные методы для расчёта характеристик подобных систем.

При выполнении данной работы было произведено моделирование поведения системы двух латерально связанных волноводов. Были построены зависимости дисперсионных характеристик от геометрических параметров системы, и на их основе найдены зависимости для длины связи в волноводах. На основе полученных данных можно судить о том, что выбор толщины волноводов и величины расстояния между ними является важным аспектом при рассмотрении системы, так как оказывает большое влияние на процессы, происходящие в ней, в частности на перекачку энергии между волноводами.

Таким образом было выявлено, что при расширении зазора между волноводами происходит увеличение длины связи, и напротив, при увеличении толщины волноводной плёнки – её уменьшение.

## Список литературы

1. V. E. Demidov and S. O. Demokritov, *IEEE Trans. Magn.* 51, 0800215 (2015).
2. A. V. Chumak, A. A. Serga, and B. Hillebrands, *Nat. Commun.* 5, 4700 (2014).
3. A. V. Sadovnikov, S. Davies, S. Grishin, V. Kruglyak, D. Romanenko, Y. Sharaevskii, and S. Nikitov, *Appl. Phys. Lett.* 106, 192406 (2015).
4. K. Vogt, F. Fradin, J. Pearson, T. Sebastian, S. Bader, B. Hillebrands, A. Hoffmann, and H. Schultheiss, *Nat. Commun.* 5, 3727 (2014).
5. C. Bayer, J. P. Park, H. Wang, M. Yan, C. E. Campbell, and P. A. Crowell, *Phys. Rev. B* 69, 134401 (2004).
6. V. E. Demidov, S. O. Demokritov, K. Rott, P. Krzysteczko, and G. Reiss, *Appl. Phys. Lett.* 92, 232503 (2008).
7. H. G. Bauer, J.-Y. Chauleau, G. Woltersdorf, and C. H. Back, *Appl. Phys. Lett.* 104, 102404 (2014).
8. E. Beginin, A. Sadovnikov, Y. Sharaevsky, and S. Nikitov, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 77, 1429–1431 (2013).