

## Статистические закономерности работы последовательно соединенных ЛТД ступеней

*В.М. Алексеенко\**, *А.А. Жерлицын*, *В.А. Шкляев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*alexeenko@oit.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** Выполнено численное моделирование ЛТД модуля из нескольких последовательно соединенных ЛТД ступеней с целью изучения влияния статистического разброса времени задержки срабатывания ЛТД ступеней на выходной импульс модуля. Исследовался модуль с числом ЛТД ступеней от 2 до 12 шт. и двумя типами выходной линии: вакуумной и водяной. Выходная линия имеет ступенчато нарастающий импеданс и согласованную активную нагрузку в конце. Запуск ЛТД ступеней в модуле производился как одновременно, так и последовательно. Показано, что в модуле с вакуумной выходной линией тип запуска (последовательный или одновременный) незначительно влияет на статистические параметры выходного импульса, тогда как в модуле с водяной выходной линией разница значительна. Джиттер выходного импульса модуля уменьшается с увеличением числа ЛТД ступеней в модуле.

**Ключевые слова:** ЛТД генератор, статистический разброс.

### 1. Введение

Структурным элементом ЛТД генератора является ЛТД модуль (далее модуль) из последовательно включенных ЛТД ступеней (далее ступеней) и выходной линии с водяной или вакуумной изоляцией. ЛТД генератор может использоваться как в режиме сумматора индуктивного напряжения (IVA) [1], подразумевающий последовательный запуск ступеней в модуле в соответствии со скоростью прохождения импульса в выходной линии, так и в режиме одновременного запуска ступеней [2–4].

В данной работе в численном моделировании исследовано влияние типа запуска ступеней в модуле (последовательный или одновременный) на статистические параметры выходного импульса.

### 2. Численная модель модуля

В численном моделировании исследовался модуль с числом ступеней до 12 шт. Использована модель ступени, описанная в [5]. Ёмкостной накопитель данной ступени состоит из 40 секций с накопительными конденсаторами ёмкостью 40 нФ. Амплитуда напряжения  $\sim 100$  кВ на согласованной нагрузке 0.1. В модели ступени (Рис. 1) учитываются ёмкость, индуктивность и активное сопротивление накопителя, активные потери в сердечнике [6], и индуктивность выходной линии ступени. Блок  $ST$  в модели ступени – это ключ со статистическим разбросом времени срабатывания, описание приведено ниже.

Выходная линия в начале модуля имеет импеданс, равный величине согласованной нагрузки для одной ступени. В точке подключения следующей ступени импеданс линии увеличивается до величины  $n \cdot r_0$ , где  $n$  – порядковый номер ступени,  $r_0$  – величина согласованной нагрузки. Суммарная электрическая длина выходной линии равна суммарной электрической длине модуля. Активная резистивная нагрузка установлена на выходе линии и её величина равна выходному импедансу линии. Моделировалась выходная линия как с вакуумной изоляцией, так и водяной. Тип изоляции выходной линии определял только электрическую длину, без изменения импеданса.

Схема статистического ключа  $ST$  приведена на Рис. 2. Ранее в работе [7] статистический ключ имел фиксированное время срабатывания. Однако в данной работе необходимо иметь ключ с управляемым средним значением задержки срабатывания и заданными параметрами

статистического разброса времени срабатывания. Для этого из работы [8] использован компаратор с генератором опорного напряжения на основе источника постоянного тока и резистора  $R$  с заданным статистическим разбросом величины сопротивления. Поскольку напряжение на резисторе  $R$  прямо пропорционально сопротивлению, то при постоянном токе через резистор разброс величины напряжения прямо пропорционален разбросу сопротивления. При параметрах схемы, указанных на Рис. 2 и линейно нарастающем со скоростью 1 кВ/нс напряжении на входе  $IN$ , среднеквадратичное отклонение сопротивления резистора в десятках процентов соответствует среднеквадратичному отклонению по времени срабатывания ключа  $S$  в наносекундах. При этом время срабатывания ключа имеет то же распределение вероятности, что и сопротивление резистора  $R$ .

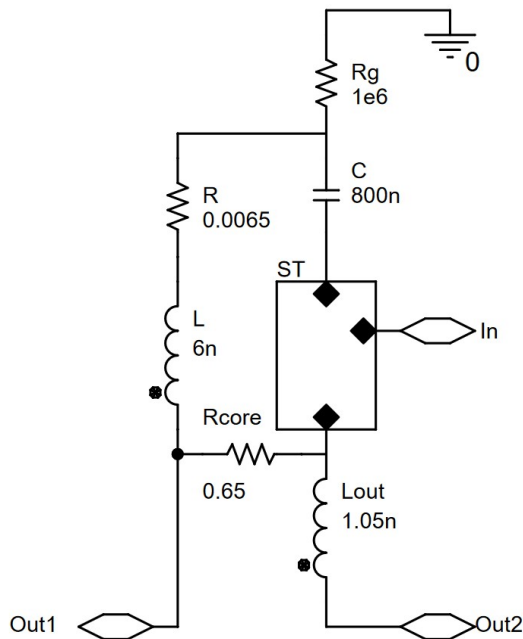


Рис. 1. Модель ступени.

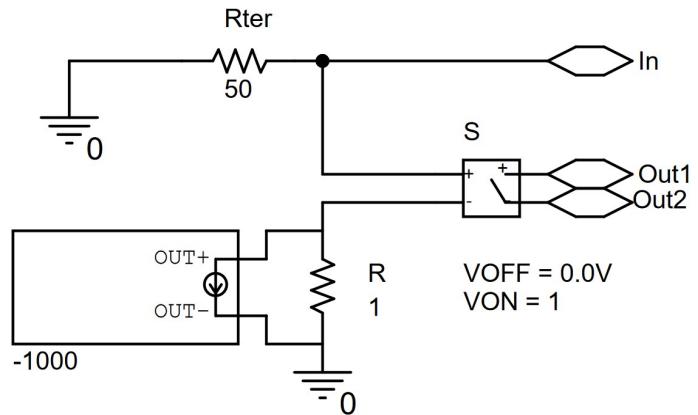


Рис. 2. Ключ со статистическим разбросом времени срабатывания.

Запуск ступеней производился через индивидуальные линии задержки, обеспечивающие необходимое номинальное время срабатывания. Это позволяло производить смену одновременного запуска на последовательный и обратно без изменений в схеме. Моделирование проводилось для четырех величин среднеквадратичного отклонения времени срабатывания (джиттер) одной ступени  $\sigma_{cavity} = 1.0, 1.5, 2.0$  и  $2.5$  нс. На каждом сочетании количества ступеней и величины джиттера производилось 600 моделирований со статистическим разбросом.

### 3. Результаты моделирования модуля с вакуумной изоляцией выходной линии

На Рис. 3 показаны зависимости среднего значения и среднеквадратичного отклонения амплитуды выходного импульса напряжения от числа ступеней в модуле в статистическом моделировании при наибольшем значении джиттера ступеней  $\sigma_{cavity} = 2.5$  нс. Видно, что амплитуда выходного импульса модуля и его статистический разброс не зависит от типа запуска ступеней в модуле. Отдельно стоит отметить, что в данной работе изменение формы выходного импульса обусловлено только разбросом времени срабатывания ступеней без учёта разброса амплитуды выходного импульса каждой ступени.

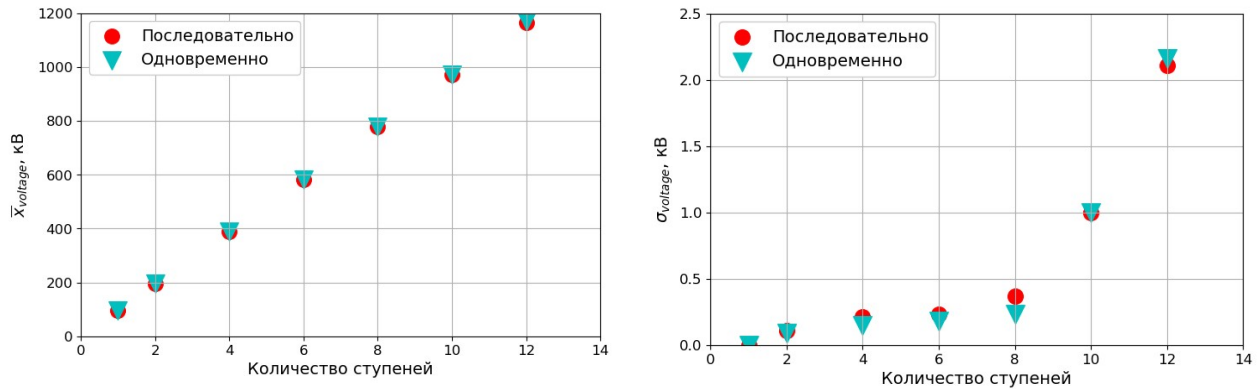


Рис. 3. Зависимость среднего значения амплитуды выходного импульса напряжения (слева) и среднеквадратичного отклонения амплитуды (справа) от числа ступеней в модуле и типа запуска при джиттере ступеней 2.5 нс.

Результаты расчета джиттера выходного импульса модуля при разном числе ступеней приведены на Рис. 4. Джиттер выходного импульса модуля уменьшается с увеличением числа ступеней в модуле и слабо зависит от типа запуска модуля. Зависимость джиттера выходного импульса модуля  $\sigma_{module}$  от числа ступеней  $N_{cavities}$  аппроксимируется выражением:

$$\sigma_{module} = \frac{\sigma_{cavity}}{N_{cavities}^{0.45}}. \quad (1)$$

Отдельно стоит отметить что в отличии от формулы в работе [9], для соответствия результатов в выражении для расчёта джиттера степень в знаменателе уменьшена с 0.5 до 0.45.

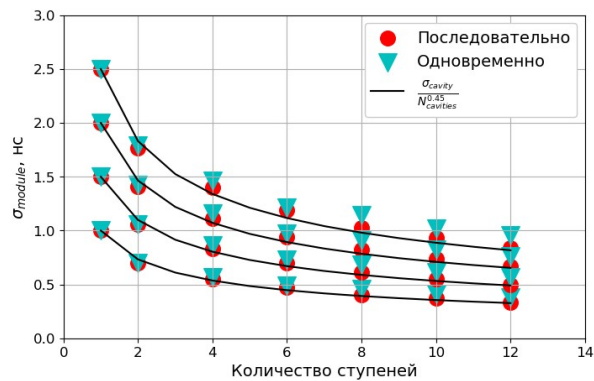


Рис. 4. Зависимость джиттера выходного импульса от числа ступеней в модуле при четырех значениях джиттера одной ступени: 1.0, 1.5, 2.0 и 2.5 нс.

#### 4. Результаты моделирования модуля с водяной изоляцией выходной линии

Средние значения и среднеквадратичные отклонения амплитуды выходного импульса напряжения от числа ступеней в статистическом моделировании модуля с водяной изоляцией выходной линии при числе ступеней 1, 4, 8 и 12 шт. показаны на Рис. 5. Моделирование выполнено при наибольшем значении джиттера ступеней  $\sigma_{cavity} = 2.5$  нс. Амплитуда выходного импульса слабо зависит от типа запуска. Однако, в отличие от модуля с вакуумной изоляцией выходной линии, тип запуска влияет на разброс амплитуды. Для случая одновременного запуска ступеней в модуле разброс амплитуды выходного импульса больше, чем при последовательном запуске ступеней. Также получено, что в случае водяной

выходной линии среднееквадратичное отклонение амплитуды больше в несколько раз, чем при использовании вакуумной выходной линии.

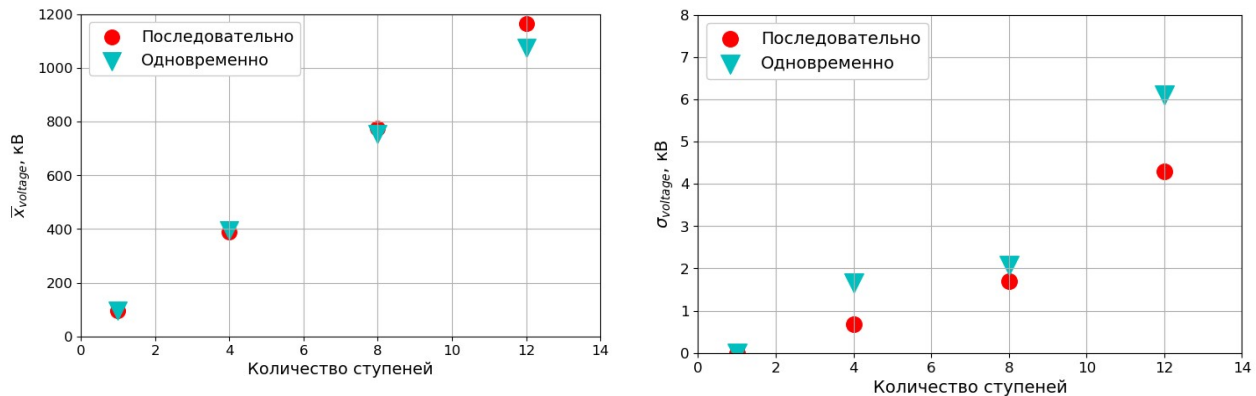


Рис. 5. Зависимость среднего значения амплитуды выходного импульса напряжения (слева) и среднееквадратичного отклонения амплитуды (справа) от числа ступеней в модуле и типа запуска при джиттере ступеней 2.5 нс.

Джиттер выходного импульса модуля для двух крайних значений джиттера одной ступени  $\sigma_{cavity} = 1.0$  и 2.5 нс приведён на Рис. 6. В случае водяной выходной линии джиттер выходного импульса модуля больше чем для случая с вакуумной выходной линией. Причем в отличии случая с вакуумной выходной линией, использование одновременного запуска вместо последовательного приводит к значительному увеличению джиттера выходного импульса. Также отметим, что выражение (1) не применимо для модуля с водяной изоляцией выходной линии.

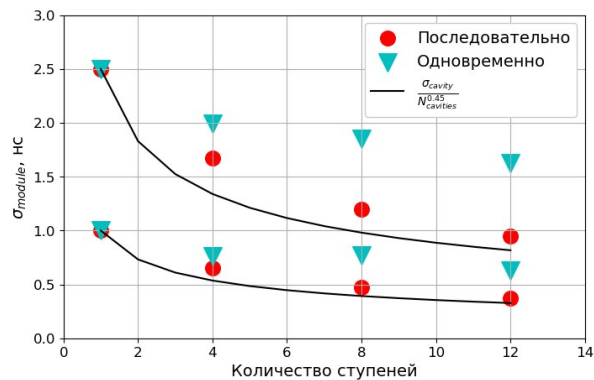


Рис. 6. Зависимость джиттера выходного импульса от числа ступеней в модуле при двух значениях джиттера одной ступени: 1.0 и 2.5 нс.

## 5. Выводы

В численном статистическом моделировании показано, что при увеличении числа ступеней в модуле происходит уменьшение джиттера выходного импульса относительно джиттера одной ступени. Для модуля с вакуумной изоляцией выходной линии зависимость джиттера выходного импульса модуля от числа ступеней можно аппроксимировать выражением (1).

Статистические параметры амплитуды выходного импульса ЛТД модуля зависят от типа выходной линии. Если для вакуумной выходной линии нет разницы для последовательного или одновременного запуска ступеней, то для водяной выходной линии имеется отличия для среднееквадратичного отклонения – последовательный запуск ступеней дает больший разброс

в амплитуде выходного импульса. Кроме того, в случае водяной выходной линии среднеквадратичное отклонение амплитуды больше в несколько раз, чем при использовании вакуумной выходной линии.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

### 7. Список литературы

- [1] I. Smith, et al., Induction voltage adder architectures and electrical characteristics, *Proc. 14<sup>th</sup> IEEE Pulse Power Conference (PPC)*, Dallas, USA, 371, 2003; doi: 10.1109/PPC.2003.1277731
- [2] J. Leckbee, et al., Linear transformer driver (LTD) research for radiographic applications, *Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Pulse Power Conference (PPC)*, Chicago, USA, 614, 2011; doi: 10.1109/PPC.2011.6191550
- [3] M. Toury, et al., Transfer and test of a 1 MV LTD generator at CEA, *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, San Francisco, USA, 1, 2013; doi: 10.1109/PPC.2013.6627521
- [4] L. Chen, et al., Development of a fusion-oriented pulsed power module, *Phys. Rev. Accel. Beams.*, vol. **22**(3), 030401, 2019; doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.030401
- [5] A.A. Kim, et al., Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages, *Phys. Rev. Spec. Top.-AC*, vol. **12**(5), 050402, 2009; doi: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050402
- [6] A.A. Kim, et al., Energy loss due to eddy current in linear transformer driver cores, *Phys. Rev. Spec. Top.-AC*, vol. **13**(7), 070401, 2010; doi: 10.1103/PhysRevSTAB.13.070401
- [7] V.M. Alexeenko, et al, Factors affecting the output pulse flatness of the linear transformer driver cavity systems with 5th harmonics, *Phys. Rev. Accel. Beams.*, vol. **19**(9), 090401, 2016; doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.090401
- [8] V.M. Alexeenko, et al., Optimization of the numerical model of the triggerable LTD spark gap switch, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. **1393**(1), 012068; doi: 10.1088/1742-6596/1393/1/012068
- [9] A.A. Kim, et al., Statistical Regularity in LTD Technology, *Proc. 20<sup>th</sup> International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE)*, Tomsk, Russia, 123, 2018; doi: 10.1109/ISHCE.2018.8521228