

Применение агрегатируемого цифрового двойника для управления высокоэффективным импульсным стабилизатором напряжения

Ю.В. Краснобаев, А.С. Климов, Е.А. Голубев, И.Е. Бородин, Е.Ю. Янаев

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы управления импульсным стабилизатором напряжения, имеющим потенциальные возможности по обеспечению высоких: удельных характеристик, КПД и качества выходного напряжения. Показано, что для управления этим стабилизатором целесообразно использовать цифровое вычислительное устройство. Приведены осциллограммы процессов в макете импульсного стабилизатора напряжения с цифровым устройством управления и сделан промежуточный вывод об увеличении длительности переходных процессов в макете стабилизатора в сравнении с минимально возможной по причине недостатка времени, необходимого для точного вычисления длительности сигналов управления силовыми транзисторами стабилизатора. Предложено заранее провести вычисления необходимых длительностей сигналов управления силовыми транзисторами стабилизатора при пошаговом изменении внешних условий работы стабилизатора и занести полученные результаты в память цифрового устройства управления. Приведены временные диаграммы процессов в имитационной модели стабилизатора, управление в которой реализовано по предложенному варианту.

Ключевые слова: автономная система электропитания, цифровой двойник, импульсный стабилизатор напряжения, цифровое вычислительное устройство.

Импульсные стабилизаторы напряжения (ИСН) и преобразователи напряжения широко применяются в самых разных технических областях: промышленности, транспорте, связи, медицине, светотехнике и энергетике, использующей энергию возобновляемых источников [1, 2]. К ИСН предъявляется широкий спектр требований по обеспечению высоких показателей по обеспечению надёжности функционирования, КПД, электромагнитной совместимости, качества напряжения на выходе в установившихся и переходных режимах. При применении ИСН в автономных мобильных системах электропитания, к ним дополнительно применяются требования по обеспечению высоких показателей по удельно-массовым характеристикам [1, 3].

Всей совокупности вышеперечисленных требований удовлетворяет ИСН, функциональная схема которого приведена на рис. 1. Силовая часть этого ИСН известна давно и применяется для создания ИСН, выполняющих

функцию зарядно-разрядных устройств (ЗРУ) аккумуляторных батарей, поскольку силовая часть ИСН симметрична и позволяет осуществлять реверс потока энергии через ИСН. Управление ИСН осуществляется посредством цифрового вычислительного устройства (ЦВУ), содержащего аналого-цифровой преобразователь (АЦП), вычислительное (ВУ) и запоминающее (ЗУ) устройства.

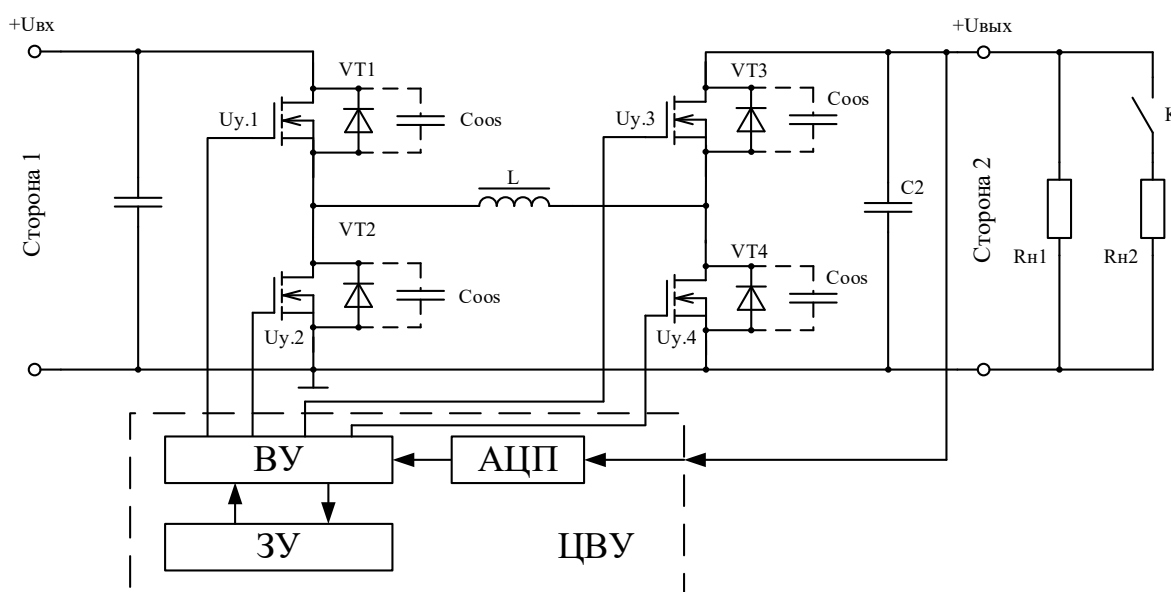


Рис. 1. – Функциональная схема ИСН

Для этой силовой части в [4, 5] предложена новая стратегия управления, которая позволила существенно повысить КПД, электромагнитную совместимость и надёжность функционирования ИСН. Эта новая стратегия управления заключается в сочетании широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигналов управления транзисторами ИСН, выполняющих функцию силовых ключей ИСН, с формированием специальных пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$, между моментами выключения и включения транзисторов, соединённых в пары. Эти паузы по длительности и назначению отличаются от так называемого «мёртвого времени» при переключении силовых транзисторов мостовых инверторов напряжения. На интервалах пауз возникает колебательный процесс в LC -контуре,

образованном паразитными ёмкостями C_{oss} сток-исток транзисторов и дросселем L ИСН, и переключение силовых транзисторов происходит при нулевом напряжении на транзисторах, подобно тому, как это происходит в резонансных преобразователях [6]. Такой режим переключения транзисторов исключает динамические потери в них и позволяет повысить КПД ИСН до 99,2 %, снизить уровень электромагнитных помех и повысить надёжность функционирования [4, 5, 7].

Для обеспечения режима переключения транзисторов при нуле напряжения, кроме формирования специальных пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$, требуется формирование специальной траектории тока I_L дросселя L , при которой возникает режим работы ИСН, близкий к режиму прерывистого тока. Временные диаграммы тока I_L дросселя и сигналов управления $U_{y.1} - U_{y.4}$ силовыми транзисторами ИСН приведены на рис. 2.

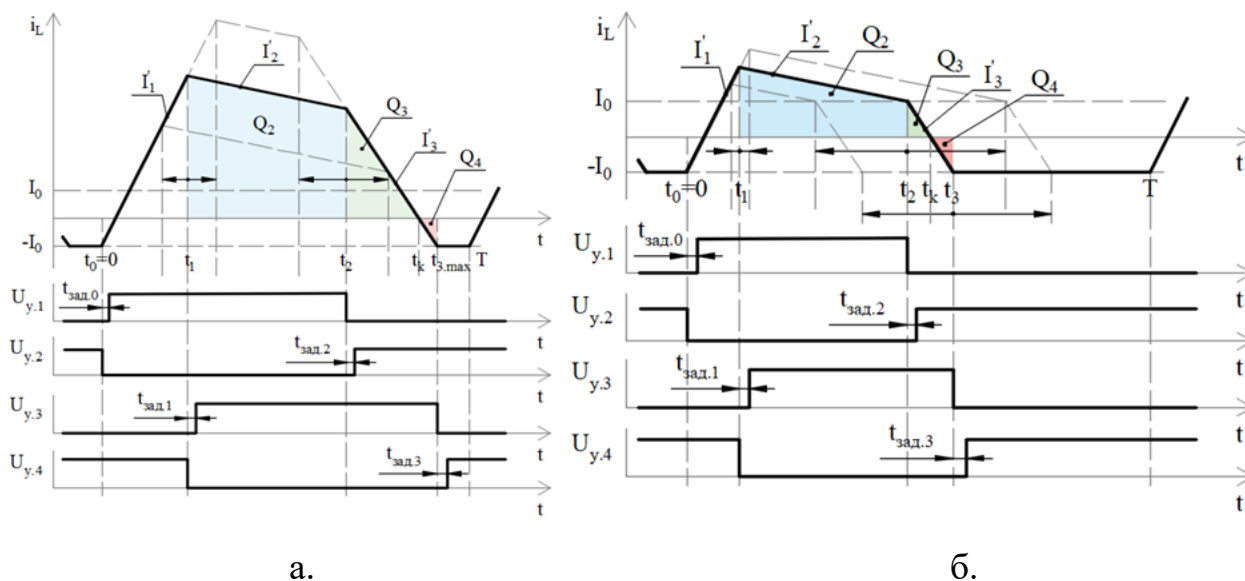


Рис. 2. – Временные диаграммы тока I_L дросселя L и сигналов управления $U_{y.1} - U_{y.4}$ силовыми транзисторами

Отличие режимов состоит в том, что в рассматриваемом ИСН обеспечивается некоторый ток I_0 дросселя, направление которого противоположно тому, при котором происходит процесс передачи энергии в

ИСН. Этот ток I_0 нужен для создания колебательного процесса в LC -контуре, который необходим для обеспечения нулевого напряжения на транзисторах в момент их включения. При изменении режимов работы ИСН стабилизация напряжения на одной из его сторон обеспечивается за счёт смещения моментов переключения транзисторов $t_1 - t_3$ относительно начала периода (см. рис. 2). В процессе работы ИСН момент времени t_1 изменяется по принципу ШИМ, а моменты времени t_2 и t_3 зависят от t_1 и вычисляются по математическим выражениям, учитывающим параметры ИСН и режим его работы.

Для подтверждения работоспособности ИСН с законами управления и стабилизации напряжения на выходе ИСН, была разработана его имитационная модель в среде *OrCAD*, в которой моменты времени $t_1 - t_3$ вычисляются графо-аналитическим способом. На рис. 3 приведены временные диаграммы процессов в имитационной модели ИСН при ступенчатом изменении тока I_0 нагрузки. Напряжение на входе ИСН равно 65 В, а на выходе – 100 В. Модель ИСН имеет следующие параметры: период преобразования $T = 20$ мкс, индуктивность дросселя $L = 20$ мкГн, ёмкость конденсатора выходного фильтра $C_\Phi = 500$ мкФ, а его внутреннее активное сопротивление равно 6 мОм.

На временных диаграммах приведены: $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе ИСН; i_L – ток дросселя L ИСН; i_H – ток нагрузки. При рассмотрении временных диаграмм видно, что установившийся режим наступает через 4 – 6 периодов преобразования T и при этом напряжение на выходе ИСН выходит на уровень 100 В, т.е. отсутствует статическая ошибка. По причине значительной сложности математических операций, необходимых для вычисления моментов переключения транзисторов $t_1 - t_3$ и специальных пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$, реализация устройства управления ИСН на основе аналоговых компонентов не рассматривалась.

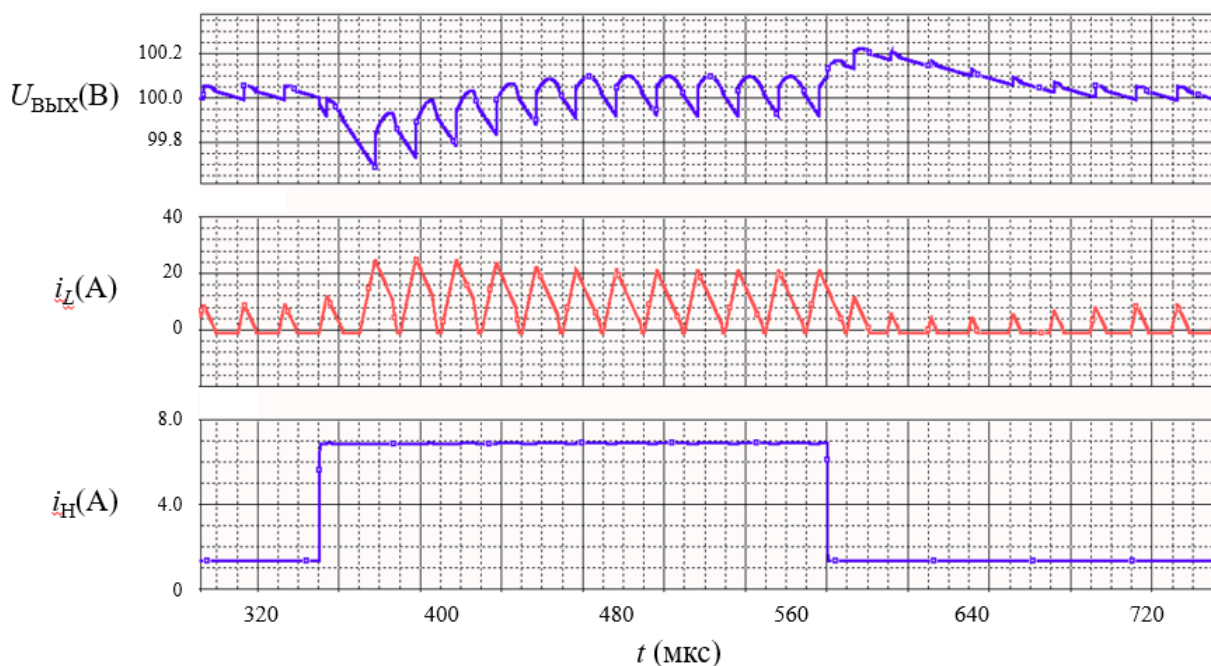


Рис. 3. – Временные диаграммы процессов в имитационной модели ИСН

В настоящее время для управления ИСН начинают применяться цифровые вычислительные устройства (ЦВУ) [8]. Для проверки работоспособности рассматриваемого ИСН был создан его физический макет с ЦВУ, выполненный в соответствии с функциональной схемой, приведённой на рис. 1. Макет ИСН имеет следующие параметры: на выходе ИСН ёмкость конденсатора $C = 1000$ мкФ, индуктивность дросселя $L = 8$ мкГн, а период преобразования $T = 20$ мкс. Напряжения на сторонах 1 и 2 ИСН составляют 45 В и 50 В соответственно. Нагрузка подключена к выходу. На рис. 4 приведены осциллограммы, полученные при испытаниях макета ИСН. На осциллограммах (сверху вниз) показаны: - напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ (масштаб – 500 мВ/дел.); - ток i_L дросселя L (масштаб – 10 А/дел.); - ток i_H нагрузки – (масштаб 2 А/дел.). Переходный процесс вызван ступенчатым увеличением тока нагрузки. На рис. 4,а масштаб по оси времени составляет 250 мкс/дел., а на рис. 4,б – 25 мкс/дел. При рассмотрении временных диаграмм видно, что установившийся режим, с устранением статической ошибки, наступает через

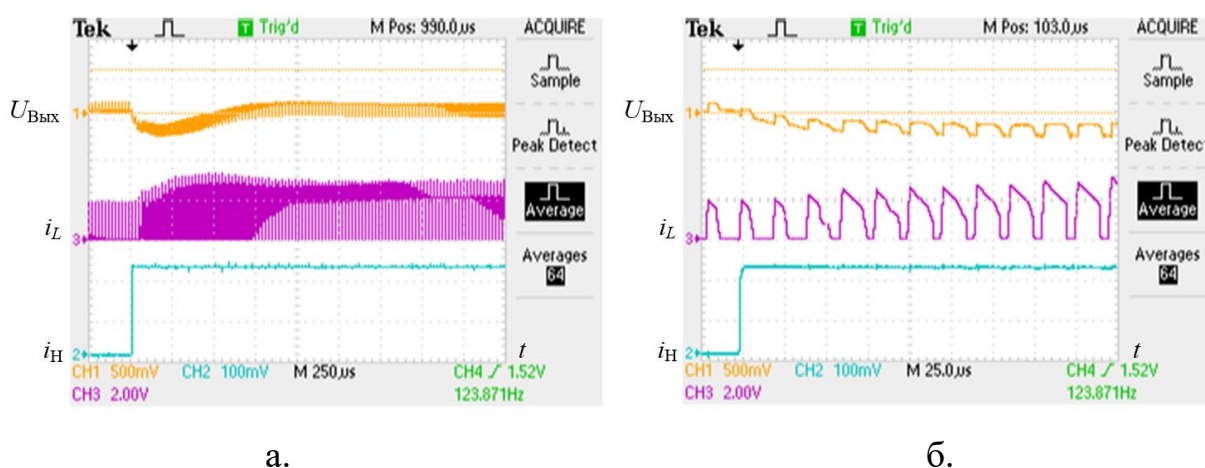


Рис. 4 – Осциллограммы, полученные при испытаниях макета ИСН

25 – 30 периодов преобразования T . В сравнении с переходным режимом в модели ИСН, длительность переходного режима в макете ИСН существенно больше. Это объясняется сложностью проведения вычислительных процедур, необходимых для вычисления моментов времени $t_1 - t_3$ и пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$, в окрестности каждого из моментов $t_1 - t_3$ за короткий интервал времени от $t_{3.\text{max}}$ до T (см. рис. 2). При периоде преобразования $T = 20$ мкс, этот интервал времени не превышает 2 мкс и его недостаточно для проведения всего объема вычислений. Поэтому в макете ИСН были использованы упрощённые формулы и процедура вычислений, что и привело к увеличению длительности переходных режимов в макете.

Для достижения в ИСН с ЦВУ характеристик переходных режимов, соответствующих характеристикам переходных режимов, полученных в модели ИСН, необходимо решить актуальную задачу сокращения времени работы ЦВУ для нахождения моментов времени $t_1 - t_3$ и пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$ на каждом периоде преобразования.

Возможным путём решения этой задачи является применение таблиц, в которые занесены моменты времени $t_1 - t_3$ и пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$, для совокупности возможных режимов работы ИСН. При этом режимы работы ИСН, определяемые значением напряжений на сторонах 1 и 2 ИСН, текущим

током нагрузки, должны быть предварительно просчитаны с некоторым шагом изменения величин напряжений и тока нагрузки. Такие таблицы определяют моменты переключения транзисторов ИСН и по сути являются его цифровым двойником (ЦД), а встраивание его в ЦВУ стабилизатора ИСН позволяет считать такой ЦД агрегатируемым. Информация из таблиц размещается в ЗУ ИСН (см. рис.1), а выбор моментов времени $t_1 - t_3$ переключения транзисторов ИСН и пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$, осуществляется ВУ, на которое в качестве сигнала обратной связи поступает выходное напряжение ИСН, оцифрованное АЦП.

Для определения моментов $t_1 - t_3$ и длительности $t_{\text{зад}}$ пауз, разработана программа для ЭВМ, в которой использованы математические выражения [9], по которым вычисляется заряд Q и энергия W , передаваемые со стороны 1 на сторону 2 ИСН за период T . Для определения пауз, длительностью $t_{\text{зад}}$ использовались математические выражения, приведённые в [6], а расчёт производился для параметров транзисторов *IRFB 4227*, использованных в макете ИСН. В ходе расчётов пошагово изменялось входное напряжение ИСН – напряжение на входе и мощность нагрузки P . Пример полученных таблиц (фрагментарно) приведён на рис. 5.

Для подтверждения работоспособности ИСН, в котором для управления используется агрегированный ЦД, в среде динамического моделирования *SimInTech* была разработана его имитационная модель. Выбор среды *SimInTech* обусловлен его широким применением для создания моделей силовых электронных устройств и возможностью бесплатного использования [10]. При работе ИСН моменты времени $t_1 - t_3$ и длительности $t_{\text{зад.1}} - t_{\text{зад.3}}$ пауз выбираются из таблиц ЦД. Выбор нужной таблицы ЦД и строки в таблице зависит от величин напряжения на сторонах ИСН и величины интеграла сигнала рассогласования выходного напряжения.

На рис. 6 приведены временные диаграммы процессов в имитационной

№ п/п	$U_{\text{вх}}$ В	t_1 мкс	t_2 мкс	t_3 мкс	$t_{\text{зад.0}}$ мкс	$t_{\text{зад.1}}$ мкс	$t_{\text{зад.2}}$ мкс	$t_{\text{зад.3}}$ мкс	Q мкКл	P Вт
1	75	1,00	2,40	2,80	0,21	0,18	0,21	0,21	2,63	13,13
2	75	1,11	2,85	3,25	0,21	0,18	0,21	0,21	3,63	18,15
3	75	1,21	3,25	3,65	0,21	0,18	0,21	0,21	4,64	23,19

№ п/п	$U_{\text{вх}}$ В	t_1 мкс	t_2 мкс	t_3 мкс	$t_{\text{зад.0}}$ мкс	$t_{\text{зад.1}}$ мкс	$t_{\text{зад.2}}$ мкс	$t_{\text{зад.3}}$ мкс	Q мкКл	P Вт
1	66	1,00	1,76	2,16	0,21	0,18	0,21	0,21	1,26	6,31
2	66	1,20	2,34	2,74	0,21	0,18	0,21	0,21	2,27	11,33
3	66	1,38	2,79	3,19	0,21	0,18	0,21	0,21	3,17	15,86
4	66	1,52	3,21	3,61	0,21	0,18	0,21	0,21	4,17	20,86
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
78	65	5,43	14,38	14,78	0,21	0,11	0,15	0,21	78,96	394,79
79	65	5,47	14,47	14,87	0,21	0,11	0,14	0,21	79,98	399,91
80	65	5,50	14,57	14,97	0,21	0,11	0,14	0,21	81,01	405,07
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
147	65	8,09	15,25	18,00	0,21	0,09	0,10	0,21	152,35	761,76
148	65	8,14	15,18	18,00	0,21	0,08	0,10	0,21	152,86	764,29
149	65	8,19	15,10	18,00	0,21	0,08	0,10	0,21	153,33	766,63
150	65	8,24	15,02	18,00	0,21	0,08	0,09	0,21	153,75	768,77

Рис.5 – Пример таблиц ЦД ИСН (фрагментарно)

модели ИСН, полученные в ходе моделирования, при ступенчатом изменении тока I_H нагрузки. Напряжение на входе ИСН равно 65 В, а на выходе – 100 В. Модель ИСН имеет следующие параметры: период преобразования $T = 20$ мкс, индуктивность дросселя $L = 20$ мкГн, ёмкость конденсатора выходного фильтра $C_{\text{ф}} = 500$ мкФ, а его внутреннее активное сопротивление равно 6 мОм.

На временных диаграммах приведены: $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе ИСН; i_L – ток дросселя L ИСН; i_H – ток нагрузки. Сравнение временных диаграмм, полученных в модели ИСН с управлением на основе точного определения моментов переключения $t_1 - t_3$ и в модели ИСН в которой моменты времени $t_1 - t_3$ и длительности $t_{\text{зад.1}} - t_{\text{зад.3}}$ пауз выбираются из таблиц ЦД показало почти полное совпадение длительности процессов перехода к установившемуся режиму и амплитуд отклонения выходного напряжения ИСН.

Система таблиц, являющаяся ЦД стабилизатора, содержит большой объём информации. Для экономии памяти ЗУ и повышения быстродействия

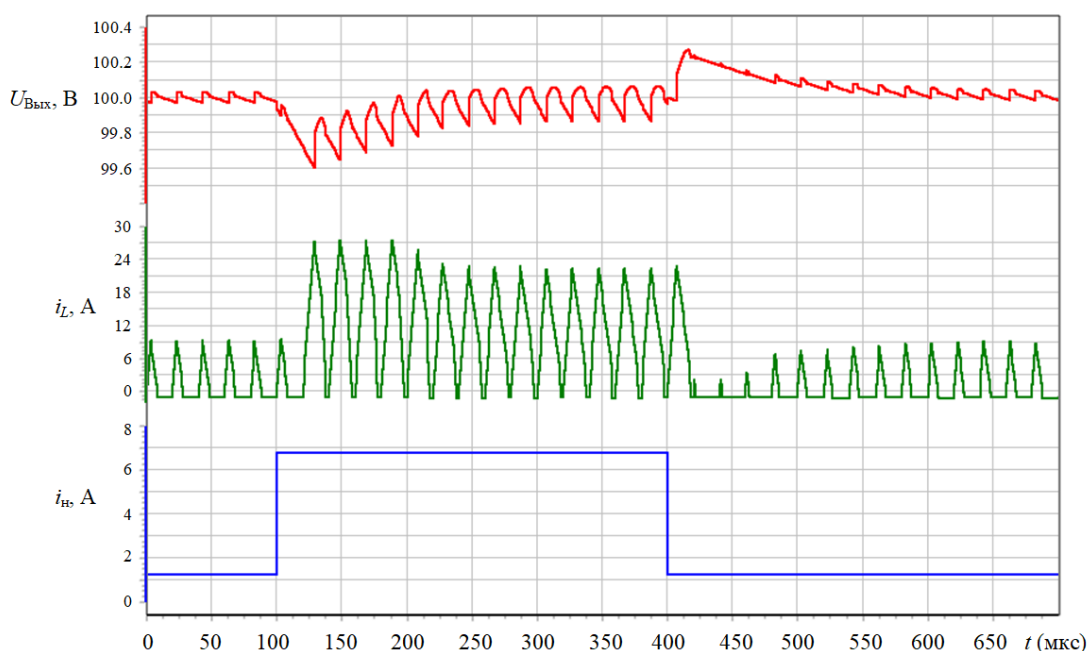


Рис. 6. – Временные диаграммы процессов в имитационной модели ИСН с ЦД

ВУ и ИСН в целом желательно минимизировать количества строк в таблицах.

Проведённый анализ процессов имитационной модели ИСН с устройством управления, выполненный с использованием цифрового двойника, подтвердил предположение о возможности управления ИСН без проведения сложных вычислений, требующих значительных затрат времени. Это позволит управлять ИСН с использованием ЦВУ и при этом обеспечить малую длительность переходных процессов, которая при управлении ИСН на основе точного определения моментов переключения его силовых транзисторов. Окончательное подтверждение возможности управления ИСН с использованием его ЦД будет получено путём экспериментальных исследований с использованием физического макета ИСН с ЦВУ, в котором использован ЦД.

Исследование выполнено при финансовой поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности», в рамках проекта «Система электропитания на основе генератора электрической энергии, использующего низкопотенциальную тепловую энергию с переменным направлением теплового потока»

Литература

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника // Техносфера: Москва, 2005, 632 с.
2. Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Антропов А.П., Михайличенко Е.А. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564.
3. Соустин Б. П., Иванчура В. И., Чернышев А. И., Исляев Ш. Н. Системы электропитания космических аппаратов // Сибирская издательская фирма: Новосибирск, 1994, 318 с.
4. Waffler S., Kolar J.W. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck + boost converters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009, Том 24, № 6, С. 1589-1599.
5. Waffler S., Kolar J.W., Wuhan (China). Efficiency Optimization of an Automotive Multi-Phase Bi-directional DC-DC Converter // Proceedings of the 6th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, С. 566-572.
6. Непомнящий О.В., Краснобаев Ю.В., Сазонов И.Е., Яблонский А.П. Метод снижения потерь энергии в импульсном преобразователе напряжения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2022, Т. 25, № 2, С. 82-90.

7. Краснобаев Ю. В. Перспективы развития зарядно-разрядных устройств систем электропитания космических аппаратов // Сибирский аэрокосмический журнал, 2024, Т. 25, № 1, С. 115–125.

8. Кабиров В.А. Энергопреобразующий комплекс с резервированной цифровой системой управления для высоковольтных систем электропитания космических аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2 / Кабиров Вагиз Александрович, Томск, 2023. 209 с.

9. Краснобаев, Ю.В., Захаров В.В., Карнаухов М.А. Анализ электромагнитных процессов в повышающе-понижающем преобразователе с возможностью реверса потока энергии и повышенным коэффициентом полезного действия // Вестник СибГАУ, 2014, Том 455, № 3, С. 100 - 107.

10. Черных И.В. Имитационное моделирование защитных цепей транзисторного коммутационного аппарата постоянного напряжения // Инженерный вестник Дона, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7318.

References

1. Meleshin V.I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika. Tekhnosfera: Moskva, 2005, 632 p.

2. Chivenkov A.I., Grebenshnikov V.I., Antropov A.P., Mihajlichenko E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564.

3. Soustin B. P., Ivanchura V. I., Chernyshev A. I., Islyayev Sh. N. Sibirskaya izdatel'skaya firma: Novosibirsk, 1994, 318 p.

4. S. Waffler, J.W. Kolar. A novel low-loss modulation strategy for high-power bidirectional buck + boost converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, T. 24, № 6, PP. 1589-1599.

5. S. Waffler, J.W. Kolar., Wuhan (China). Efficiency Optimization of an Automotive Multi-Phase Bi-directional DC-DC Converter. Proceedings of the 6th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, PP. 566-572.
6. Nepomnyashchij O.V., Krasnobaev Yu.V., Sazonov I.E., Yablonskij A.P. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki, 2022, T. 25, № 2, PP. 82-90.
7. Krasnobaev Yu. V. Sibirskij aerokosmicheskij zhurnal, 2024, T. 25, № 1, PP. 115 - 125.
8. Kabirov V.A. Energopreobrazuyushchij kompleks s rezervirovannoj cifrovoj sistemoy upravleniya dlya vysokovol'nyh sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov [Energy-converting complex with redundant digital control system for high-voltage spacecraft power supply systems]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.4.2, Tomsk, 2023. 209 p.
9. Krasnobaev, Yu.V., Zaharov V.V., Karnauhov M.A. Vestnik SibGAU, 2014, T. 455, № 3, PP. 100 - 107.
10. Chernykh I.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, No. 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7318.

Дата поступления: 8.05.2025

Дата публикации: 27.06.2025