

УДК 621.316.9

ИМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АДЕКВАТНОЙ НАСТРОЙКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

© 2019 г. Р. А. Уфа^{1, *}, В. А. Кабиров², М. В. Андреев¹,
В. Е. Рудник¹, В. А. Сулайманова¹

¹Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Новгородский Государственный Университет им. Ярослава Мудрого, Новгород, Россия

*e-mail: hecn@tpu.ru

Поступила в редакцию 03.07.2019 г.

После доработки 21.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

Ввиду усложнения процессов и режимов в современной электроэнергетической системе актуальным является дальнейшее совершенствование устройств релейной защиты и автоматики. В связи с этим возникает необходимость как в разработке новых типов защит с адаптивными алгоритмами функционирования, так и в проведении соответствующих исследований и проверок адекватности данных алгоритмов. Ввиду известной особенности функционирования электроэнергетической системы наиболее эффективным является проведение испытаний с помощью средств моделирования в режиме замкнутого цикла (closed loop testing). Одним из основных элементов данной схемы тестирования представляются усилители напряжения и тока, которые являются связующими звеньями между источником первичной информации (модель энергосистемы) и терминалом защиты и автоматики. В данной статье представлены результаты разработки и тестирования подобного испытательного комплекса с использованием импульсно-модуляционных усилителей переменного тока и напряжения, реализованные на базе усилителей D класса. Параметры разработанных усилителей напряжения и тока, в частности, диапазон выходных трехфазных токов и напряжений и их частотный диапазон, показывают, что разработанный комплекс не только не уступает усилителям других производителей, но и превосходит их по массогабаритным показателям. Для демонстрации адекватной работы разработанного комплекса были проведены соответствующие тестовые испытания, определены погрешности коэффициентов масштабного преобразования напряжения и тока, угловая погрешность выходного напряжения и тока, которые не превышают 5% и 0.1° соответственно.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, усилители переменного тока и напряжения, разработка, тестовые испытания, анализ

DOI: 10.1134/S0002331019050169

ВВЕДЕНИЕ

Надежное функционирование устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и, как следствие, электроэнергетической системы (ЭЭС) в целом, главным образом определяется адекватностью их алгоритмов функционирования.

В настоящее время современные устройства РЗА являются комплексными, сложноорганизованными устройствами, обладающими широким логическим и математическим функционалом. Соответственно, задачи тестирования подобных устройств



Рис. 1. Блок-схема организации тестирования в замкнутом цикле устройств РЗА.

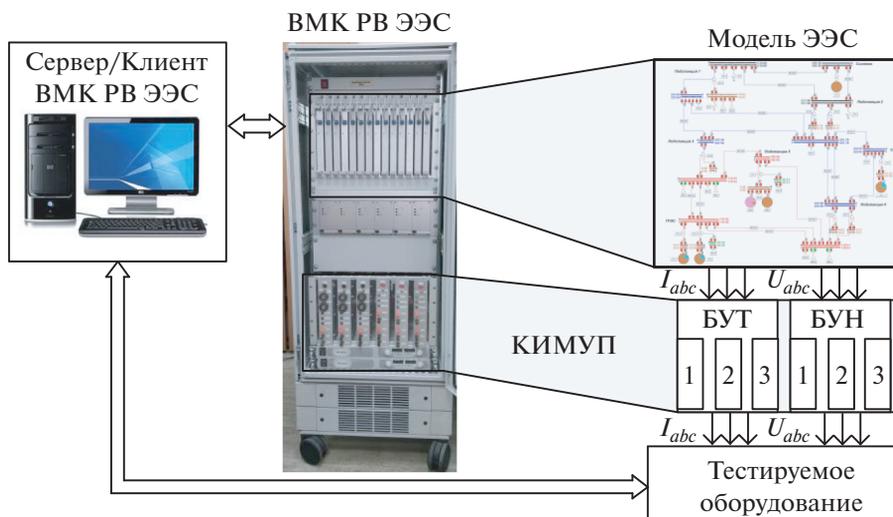


Рис. 2. Внешний вид установки для тестирования РЗА.

становится еще более сложными и требует наличия необходимого оборудования – моделирующей системы (программного комплекса или программно-аппаратного комплекса (ПАК)), а также усилителей сигналов для проведения тестирований в замкнутом цикле устройств РЗА [1–3].

Схема реализации данных тестирований включает источник сигнала – ПАК (например, ПАК RTDS [4, 5], HYPERSIM [6], Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) [7, 8]), в котором воспроизводится участок моделируемой ЭЭС и защищаемый объект), усилитель сигналов и само тестируемое устройство РЗА (рис. 1).

На рисунке 2 представлен пример реализации данной схемы, в которой модель участка исследуемой ЭЭС реализована в ВМК РВ ЭЭС, а в качестве усилителя сигнала используется разработанный комплекс импульсно-модуляционных усилителей переменного тока и напряжения (КИМУП).

В рамках данной статьи представлены результаты разработки КИМУП, состоящего из трех блоков усиления тока (БУТ), трех блоков усиления напряжения (БУН) и источника питания 12 В, 200 А; сравнения разработанных БУТ и БУН с существующими аналогами по основным параметрам усилителей; оценки регулировочных характеристик БУН и БУТ, коэффициентов усиления в зависимости от частоты сигнала; определения амплитуды пульсации на частоте преобразования и угловой погрешности выходного сигнала.

II. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ИМПУЛЬСНО-МОДУЛЯЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

При построении усилителей токов и напряжений для вышеобозначенных задач необходимо учитывать специфику этих задач, которая выражается в следующем:

1) для высокочастотного усиления тока и напряжения необходимо строить систему обратной связи по мгновенным значениям (а не по среднему за период, как это реализовано у других разработчиков), что увеличивает глубину обратной связи и вызывает сложности в плане устойчивости усилителей при работе на неоднородную и (или) переменную нагрузку;

2) в данном ракурсе, вызывает сложности проблема минимизации сдвига фазы между входным и выходным сигналами. При этом данный вопрос является принципиальным, поскольку для отдельных устройств РЗА фаза между токами и (или) напряжениями является важнейшим параметром.

Блоки усиления напряжения (БУН) реализованы на базе усилителя класса D , в котором высокая точность формирования выходного напряжения достигается за счет использования последовательно соединенных автономных инверторов напряжения, каждый из которых имеет независимый источник питания и формирует выходное напряжение в определенной зоне от общего диапазона изменения выходного сигнала, что представляет собой многозонную импульсную модуляцию [9, 10].

Функциональная схема БУН (рис. 3) включает четыре одинаковых ячейки – мостовой инвертор напряжения, системой управления которых является программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). В данной схеме отрицательная аналого-цифровая обратная связь включает усилитель ошибки (сумматор), корректирующее звено и ПЛИС [11].

Использование данной обратной связи в совокупности с высокой частотой модуляции $f = 100$ кГц и малой расчетной частотой общего выходного LC -фильтра, обеспечивает минимальное отклонение по фазе в заданном диапазоне частот выходного сигнала.

В схеме мостового инвертора при замыкании диагональных транзисторных ключей формируется положительная или отрицательная полуволна выходного напряжения ($U_{\text{вых}}$), соответственно, при запертом состоянии всех транзисторных ключей формируется нулевой уровень напряжения. Таким образом, осуществляется возможность добавления или исключения источника напряжения ($U_{\text{ист}}$) в контур протекания тока нагрузки, тем самым осуществляя многозонную импульсную модуляцию в пределах восьми зон [9, 10].

Блоки усиления тока (БУТ) реализованы на базе усилителя класса D , однако, выходы всех четырех мостовых преобразователей подключены параллельно через выходные дроссели (L), что также позволяет формировать выходной ток ($I_{\text{вых}}$) на подключаемой нагрузке ($R_{\text{н}}$) любой формы в заданном диапазоне частот. Данная схема импульсно-модуляционного усилителя (рис. 4) позволяет решать задачу преобразования входного сигнала ($U_{\text{вх}}$) в пропорциональный ему ток [11, 12].

Более подробно о построении усилителей и оригинальных решениях можно ознакомиться в [13].

III. СОВРЕМЕННЫЕ УСИЛИТЕЛИ, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ НА РЫНКЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрим современные усилители, используемые при испытании устройств РЗА, в сравнении с разработанным КИМУП.

Сравнение представленных в табл. 1 параметров широко используемых усилителей и разработанного экспериментального образца КИМУП показывает, что:

– диапазон выходных трехфазных токов и напряжений БУН и БУТ не уступает (и даже превышает) диапазону выходных сигналов рассмотренных усилителей;

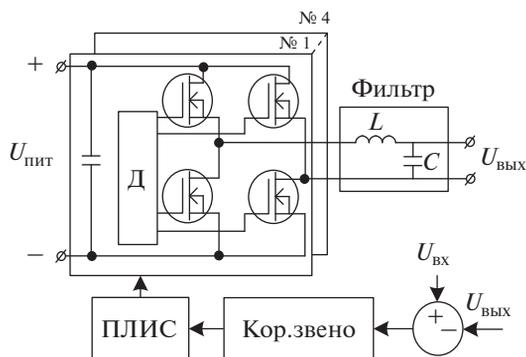
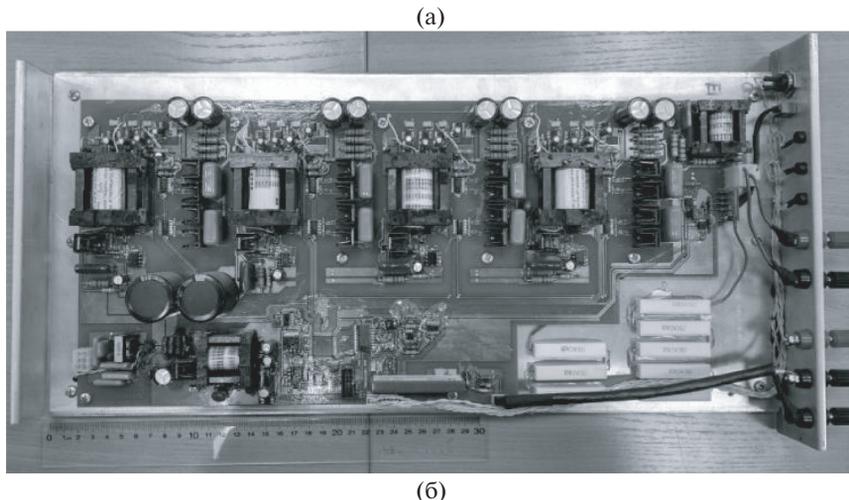


Рис. 3. Внешний вид (а) и функциональная схема (б) БУН.

Таблица 1. Характеристики усилителей сигналов

Модель усилителя	Режим работы	Параметры усилителя					
		I_{\max} , А	$K_{ПИ}$, А	U_{\max} , В	$K_{ПИU}$, В	f_{\max} , Гц	$K_{пф}$, °
Retom-61 [14]	3-фазный	72	± 0.6	135	± 0.5	1	± 0.3
	1-фазный	200	± 4.8	405	± 4.9	2.1	
Retom-71 [15, 16]	3-фазный	40	± 0.6	135	± 0.5	1	± 0.1
	1-фазный	128		600			
CMS 356 [17]	3-фазный	64	± 0.05	300	± 0.09	1	± 0.05
	1-фазный	128		600			
PAC2000C [18]	1-фазный	200	0.2	—	—	5	0.2
PAC60Cip [18]	3-фазный	60	0.06	—	—	5	0.2
PAV250Bi [18]	6-фазный	—	—	250	± 0.25	3	0.2
КИМУП:							
БУТ	3-фазный	100	± 2	—	—	1	0.1
БУН	3-фазный	—	—	300	± 0.6	1	0.1

$K_{ПИ}$, А — погрешность воспроизведения тока;

$K_{ПИU}$, В — погрешность воспроизведения напряжения;

$K_{пф}$, ° — угловая погрешность выходного напряжения или тока.

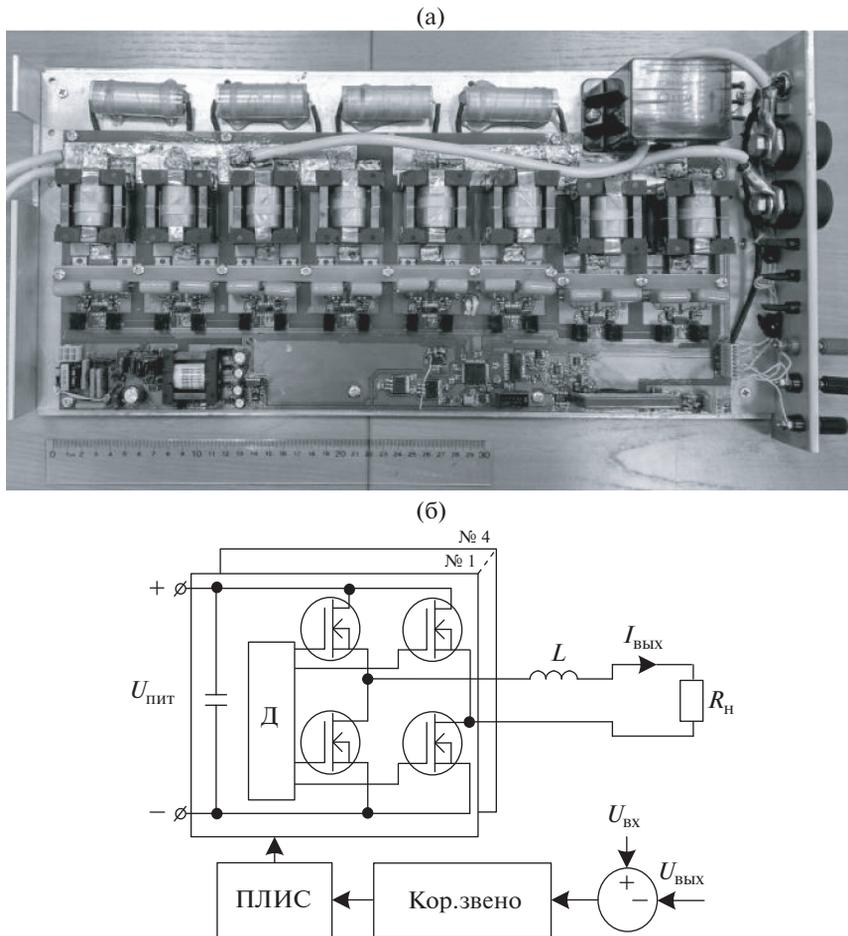


Рис. 4. Внешний вид (а) и функциональная схема (б) БУТ.

– частотный диапазон выдаваемых БУН и БУТ токов и напряжений, равный 1000 Гц, охватывает весь значимый в электроэнергетических системах частотный спектр процессов, включая коммутационные перенапряжения;

– коэффициенты $K_{нф}$ и $K_{пф}$ разработанного экспериментального образца не превышают аналогичных показателей рассмотренных и широко используемых усилителей;

– коэффициенты $K_{пU}$ и $K_{пI}$ разработанного КИМУП превышают аналогичные показатели рассмотренных усилителей, однако в целом не превышают 5%, что для экспериментального образца может считаться приемлемым.

Для демонстрации адекватной работы КИМУП были проведены соответствующие тестовые испытания БУТ и БУН, результаты которых представлены далее.

IV. ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КИМУП

Программа тестовых испытаний БУН и БУТ включает проверки регулировочных характеристик, коэффициентов усиления в зависимости от частоты сигнала, определение амплитуды пульсации на частоте преобразования и угловой погрешности выходного сигнала.

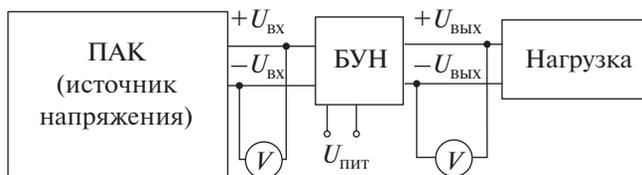


Рис. 5. Схема тестирования БУН.

А. Тестовые испытания БУН

Схема тестирования БУН (рис. 5) включает источник напряжения, вольтметры (V) и нагрузку, в качестве которой используется резистор ($R = 900 \text{ Ом}$) и дроссель ($R = 380 \text{ Ом}$, $L = 2.3 \text{ Гн}$).

После подачи питания на БУН задается входное напряжение ($U_{\text{ВХ}}$) в диапазоне от 0 до 10 В (амплитудного значения) и с частотой от 0 до 1000 Гц. По измеренному действующему значению выходного напряжения ($U_{\text{ВЫХ(д)}}$) определяется коэффициент усиления ($K_{\text{БУН_экс}}$) и его отклонение (погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения) от номинального значения ($K_{\text{БУН_ном}} = 30$). Результаты проведенных экспериментов и расчетов представлены в табл. 2.

На основании полученных результатов можно отметить, что Δ не превышает 5%, а передаточная характеристика БУН представляет собой линейную зависимость (рис. 6), что в целом подтверждает адекватность разработанного БУН.

Для подтверждения адекватности частотных свойств БУН в табл. 3 представлены результаты изменений Δ в зависимости от частоты входного сигнала при использовании в качестве нагрузки измерительные преобразователи МИП-02 компании “РТСофт”.

Согласно представленной на рис. 7 амплитудно-частотной характеристике видно, что в диапазоне до 1000 Гц величина коэффициента усиления БУН не превышает 5%.

Для оценки угловой погрешности выходного сигнала в схему тестирования БУН были добавлены фазометр (Ф2-34) и делители напряжения (рис. 8). Делители выбраны из соображений получения одинакового уровня сигнала (около 1.5 В) на входах фазометра.

Таблица 2. Погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения БУН

$U_{\text{ВХ(д)}}$, В	R нагрузка									RL нагрузка		
	$f = 10 \text{ Гц}$			$f = 50 \text{ Гц}$			$f = 1000 \text{ Гц}$			$f = 50 \text{ Гц}$		
	$U_{\text{ВЫХ(д)}}$, В	$K_{\text{БУН_экс}}$	Δ , %									
0.71	21.40	30.27	0.90	21.43	30.31	1.04	21.90	30.67	2.24	21.20	29.99	0.05
1.41	42.40	29.99	0.05	42.50	30.06	0.19	43.40	30.69	2.31	42.20	29.84	0.52
2.12	63.50	29.94	0.20	63.90	30.13	0.42	64.60	30.46	1.52	63.40	29.89	0.36
2.83	84.70	29.95	0.17	84.80	29.99	0.05	85.80	30.34	1.13	84.50	29.88	0.40
3.54	105.80	29.92	0.27	105.70	29.89	0.37	109.10	30.64	2.12	105.90	29.95	0.17
4.24	127.20	29.98	0.07	127.50	30.05	0.16	130.67	30.80	2.66	127.20	29.98	0.07
4.95	148.50	30.00	0.00	149.40	30.18	0.61	151.70	30.65	2.15	148.30	29.96	0.13
5.66	169.60	29.98	0.06	170.90	30.21	0.70	174.00	30.76	2.53	169.50	29.96	0.12
6.36	190.70	29.97	0.12	194.40	30.55	1.82	196.40	30.86	2.87	190.70	29.97	0.12
7.07	211.70	29.94	0.20	215.20	30.44	1.46	218.50	30.90	3.00	211.80	29.95	0.16

$$\Delta = \frac{|K_{\text{БУН_ном}} - K_{\text{БУН_экс}}|}{K_{\text{БУН_ном}}} - \text{погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения, \%}$$

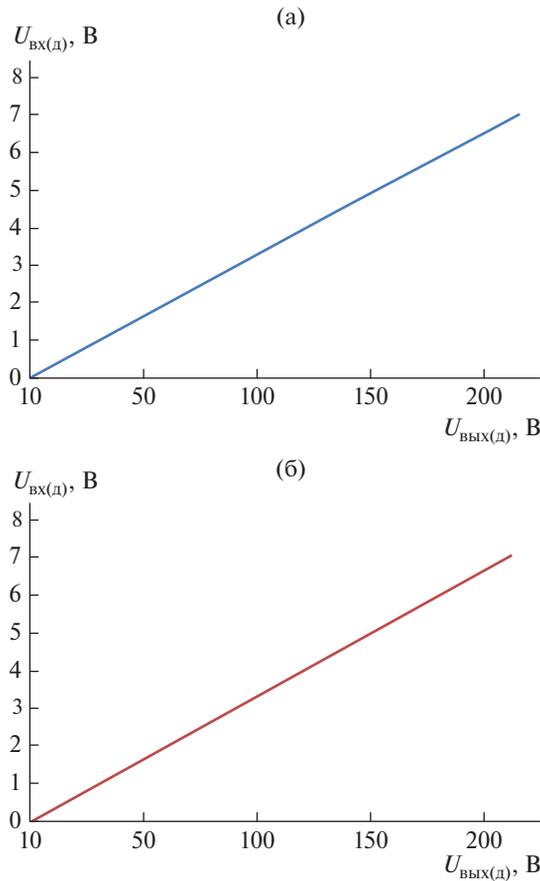


Рис. 6. Амплитудная (передаточная) характеристика БУН при $f = 50$ Гц в случае R нагрузки (а) и RL нагрузки (б).

В табл. 4 представлены результаты измерения угловой погрешности выходного сигнала БУН в зависимости от частоты входного сигнала, которые показывают приемлемую угловую погрешность выходного сигнала (не более 0.1°) и корректность функционирования БУН в заданном диапазоне частот.

Таблица 3. Погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения БУН в зависимости от частоты входного сигнала

$f, \text{ Гц}$	$U_{\text{ВХ}} = 1, \text{ В}$			$U_{\text{ВХ}} = 5 \text{ В}$			$U_{\text{ВХ}} = 10 \text{ В}$		
	$U_{\text{ВЫХ(д)}}, \text{ В}$	$K_{\text{БУН_ЭКС}}$	$\Delta, \%$	$U_{\text{ВЫХ(д)}}, \text{ В}$	$K_{\text{БУН_ЭКС}}$	$\Delta, \%$	$U_{\text{ВЫХ(д)}}, \text{ В}$	$K_{\text{БУН_ЭКС}}$	$\Delta, \%$
10.00	21.40	30.17	0.58	105.80	29.90	0.32	211.70	29.94	0.19
50.00	21.43	30.03	0.09	105.70	29.72	0.95	215.20	30.44	1.46
100.00	21.50	30.15	0.51	106.60	29.97	0.10	216.30	30.59	1.98
150.00	21.56	30.21	0.71	106.65	29.97	0.11	217.10	30.71	2.36
400.00	21.02	29.46	1.81	107.77	30.27	0.91	217.50	30.76	2.55
800.00	21.35	29.90	0.33	108.40	30.44	1.41	217.80	30.81	2.69
1000.00	21.90	30.67	2.24	109.10	30.64	2.12	218.50	30.90	3.00

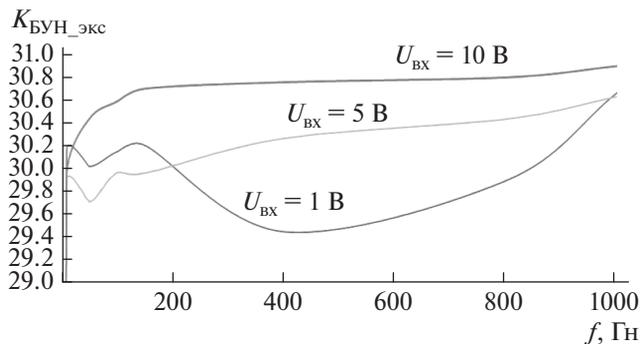


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика БУН.

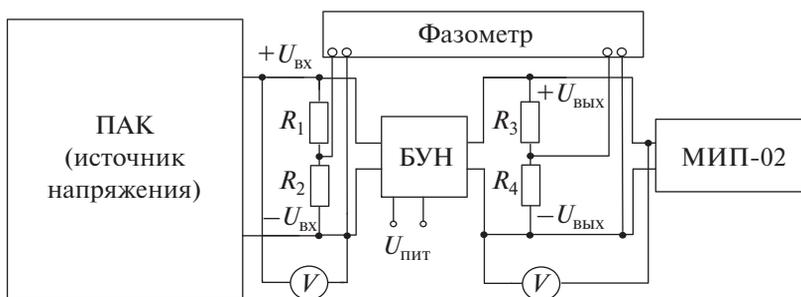


Рис. 8. Схема тестирования БУН для оценки угловой погрешности выходного сигнала, где: $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 10$ кОм, $R_3 = 30$ кОм, $R_4 = 510$ Ом (тип резисторов CF-0.25, точность 5%).

Б. Тестовые испытания БУТ

Схема тестирования БУТ, проставленная на рис. 9, включает источник тока и датчик Холла (*LEM LT 300-S/SP2*). Здесь выход БУТ закорочен проводом ПВ-3 16 мм² длиной $l = 0.35$ м (для токов более 100 А длина провода была уменьшена до 10 см).

После подачи питания на БУТ задаем входное напряжение ($U_{ВХ}$) в диапазоне от 0 до 10 В (амплитудного значения) и с частотой от 0 до 1000 Гц. По измеренному действующему значению выходного тока ($I_{ВЫХ(д)}$) определяем коэффициент усиления

Таблица 4. Угловая погрешность выходного сигнала БУН в зависимости от частоты входного сигнала

f , Гц	$U_{ВХ(д)}$, В	$U_{ВЫХ(д)}$, В	Угловая погрешность выходного сигнала	
10	3.54	105.80	0.09–0.40 (мкс)	0.0016–0.0072 (°)
50	3.56	105.70	0.01–0.25 (мкс)	0.0002–0.0045 (°)
100	3.56	106.60	0.03–0.16 (мкс)	0.0005–0.0029 (°)
300	3.56	106.65	0.23–0.27 (мкс)	0.0041–0.0049 (°)
500	3.56	107.77	0.97–1.01 (мкс)	0.0175–0.0182 (°)
800	3.56	110.29	2.86–2.87 (мкс)	0.0515–0.0517 (°)
1000	3.56	112.10	3.35–3.51 (мкс)	0.0603–0.0632 (°)

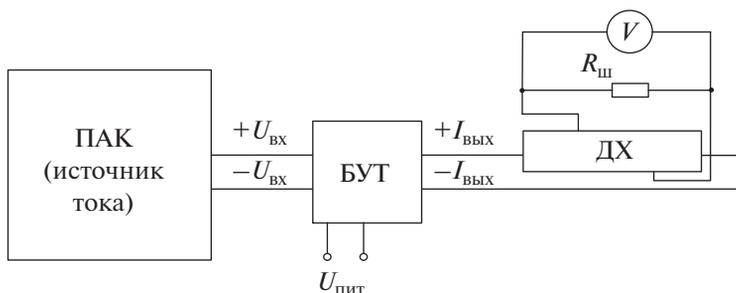


Рис. 9. Схема тестирования БУТ для оценки угловой погрешности выходного сигнала, где: ДХ – датчик Холла, $R_{Ш}$ – сопротивление шунта (тип CF-0.25, точность 5%).

($K_{\text{БУТ_экс}}$) и его отклонение от номинального значения ($K_{\text{БУТ_ном}} = 10$). Результаты проведенных экспериментов и расчетов представлены в табл. 5.

На основании полученных результатов можно отметить, что Δ не превышает 5%, а передаточная характеристика БУТ представляет собой линейную зависимость (рис. 10), что в целом подтверждает адекватность разработанного БУТ.

Для подтверждения адекватности частотных свойств БУТ в табл. 6 представлены результаты изменения Δ в зависимости от частоты входного сигнала при использовании в качестве нагрузки терминала релейной защиты *Sepam-40*.

Согласно представленной на рис. 11 амплитудно-частотной характеристике видно, что в диапазоне до 1000 Гц величина коэффициента усиления БУТ не превышает 5%.

Для оценки угловой погрешности выходного сигнала в схему тестирования БУТ были добавлены фазометр (Ф2-34) и делители напряжения (рис. 12). Делители выбраны из соображений получения одинакового уровня сигнала (около 1 В) на входах фазометра (при входном напряжении БУТ $U_{\text{ВХ}} = \pm 10$ В).

В табл. 7 представлены результаты измерения угловой погрешности выходного сигнала БУТ в зависимости от частоты входного сигнала, которые показывают приемле-

Таблица 5. Погрешность коэффициента масштабного преобразования тока БУТ

$U_{\text{ВХ(д)}}$, В	$f = 10$ Гц			$f = 50$ Гц			$f = 1000$ Гц		
	$I_{\text{ВЫХ(д)}}$, А	$K_{\text{БУТ_экс}}$	Δ , %	$I_{\text{ВЫХ(д)}}$, А	$K_{\text{БУТ_экс}}$	Δ , %	$I_{\text{ВЫХ(д)}}$, А	$K_{\text{БУТ_экс}}$	Δ , %
0.71	6.92	9.74	2.57	6.88	9.74	2.57	6.97	9.80	1.99
1.41	13.94	9.83	1.69	14.09	9.84	1.65	14.02	9.87	1.27
2.12	20.97	9.86	1.43	20.98	9.86	1.39	21.10	9.90	1.01
2.83	27.92	9.87	1.31	28.02	9.87	1.30	28.22	9.91	0.89
3.54	34.96	9.88	1.19	35.02	9.88	1.20	34.98	9.92	0.80
4.24	41.94	9.89	1.13	42.06	9.89	1.10	42.13	9.93	0.72
4.95	49.44	9.89	1.12	49.57	9.89	1.08	49.72	9.93	0.69
5.66	55.94	9.89	1.07	56.16	9.89	1.05	56.27	9.93	0.66
6.36	63.18	9.90	1.04	63.08	9.90	1.02	63.18	9.94	0.62
7.07	70.12	9.90	1.03	69.93	9.90	1.01	70.59	9.94	0.61

$$\Delta = \frac{|K_{\text{БУТ_ном}} - K_{\text{БУТ_экс}}|}{K_{\text{БУТ_ном}}} - \text{погрешность коэффициента масштабного преобразования тока, \%}$$

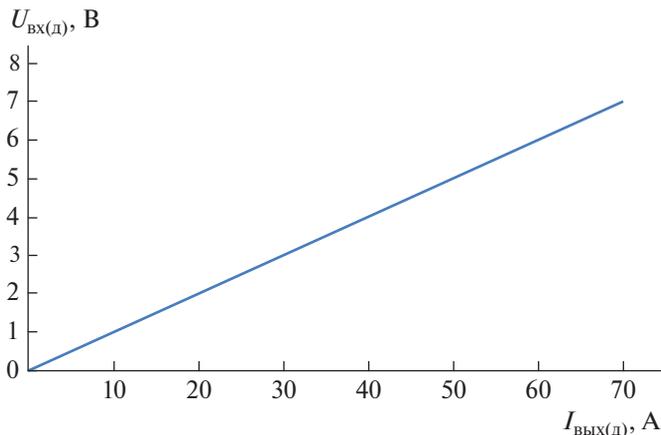


Рис. 10. Амплитудная (передаточная) характеристика БУТ при $f = 50$ Гц.

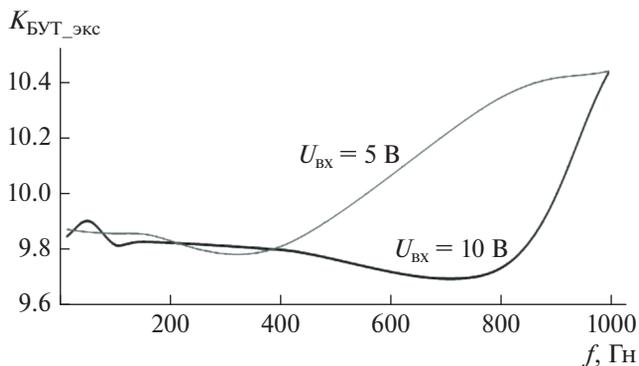


Рис. 11. Амплитудно-частотная характеристика БУТ.

мую величину угловой погрешности выходного сигнала (не более 0.1°) и корректность функционирования БУТ в заданном диапазоне частот.

Кроме этого, с точки зрения адекватности усиления сигналов необходимым является определение амплитуды пульсации на частоте преобразования. Данный опыт проводился при работе БУН на холостом ходу, БУТ – в режиме короткого замыкания.

Таблица 6. Погрешность коэффициента масштабного преобразования тока БУТ в зависимости от частоты входного сигнала

f , Гц	$U_{вх} = 5$ В			$U_{вх} = 10$ В		
	$I_{вых(д)}$, А	$K_{БУТ_экс}$	Δ , %	$I_{вых(д)}$, А	$K_{БУТ_экс}$	Δ , %
10.00	34.87	9.85	1.45	69.92	9.87	1.26
50.00	35.05	9.85	1.46	69.92	9.86	1.36
100.00	34.96	9.83	1.72	69.92	9.86	1.41
150.00	35.00	9.84	1.65	69.92	9.86	1.43
400.00	34.91	9.81	1.93	69.64	9.81	1.87
800.00	34.68	9.74	2.61	73.02	10.34	3.43
1000.00	35.21	9.89	1.12	74.17	10.44	4.40

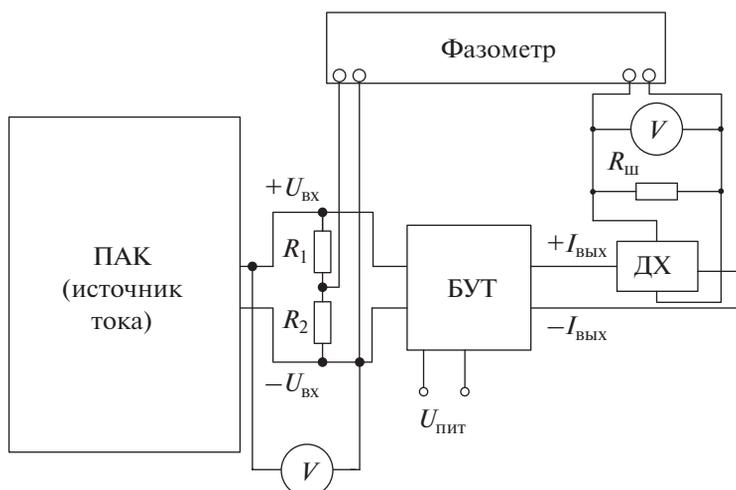


Рис. 12. Схема тестирования БУТ для оценки угловой погрешности выходного сигнала, где: $R_1 = 39 \text{ кОм}$, $R_2 = 6.8 \text{ кОм}$ (тип резисторов CF-0.25, точность 5%).

При установке максимального значения выходного напряжения БУН (для БУТ – максимального тока), что соответствует максимальному уровню пульсаций, определяем значения $U_{\text{вх.ср}}$, $U_{\text{вых.ср}}$ и амплитуду пульсаций (табл. 8 и 9 соответственно).

Результаты проведенных тестовых испытаний разработанных усилителей БУН и БУТ КИМУП показывают адекватность формируемых данными усилителями выходных токов и напряжений: погрешности коэффициентов масштабного преобразования напряжения БУН и тока БУТ не превышают 5%, а угловые погрешности выходного напряжения и тока не превышают 0.1° .

Таблица 7. Угловая погрешность выходного сигнала БУТ в зависимости от частоты входного сигнала

f , Гц	$U_{\text{вх(д)}}$, В	$I_{\text{вых(д)}}$, А	Угловая погрешность выходного сигнала	
10	7.07	69.91652	0.05–0.035	0.00063–0.0009 ($^\circ$)
50	7.07	69.91652	0.01–0.48	0.00018–0.00864 ($^\circ$)
100	7.07	69.91652	0.02–0.04	0.00036–0.00072 ($^\circ$)
300	7.07	69.91652	1.06–1.07	0.01908–0.01926 ($^\circ$)
500	7.07	69.63981	1.57–1.59	0.02826–0.02862 ($^\circ$)
800	7.07	73.42157	1.83–1.85	0.03294–0.0333 ($^\circ$)
1000	7.07	75.5221	2.01–2.25	0.03618–0.0405 ($^\circ$)

Таблица 8. Амплитуда пульсации БУН на холостом ходу

$U_{\text{вх.ср}}$, В	$U_{\text{вых.ср}}$, В	Фактическое значение, В	Предельное значение
9.38	280.3	1.5	Не более 3 В

Таблица 9. Амплитуда пульсации БУТ в режиме короткого замыкания

$U_{\text{вх.ср}}$, В	$I_{\text{вых.ср}}$, А	Фактическое значение, А	Предельное значение
10	98.5	0.1	Не более 2 А

Стоит отметить, что при необходимости величина выходного тока БУТ может быть увеличена до 200 А (в амплитуде), что потребует увеличения напряжения питания, а габаритная мощность преобразователя увеличится до 4.5 кВт.

II. ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты разработки комплекса импульсно-модуляционных усилителей переменного тока и напряжения (КИМУП), которые могут быть использованы для построения полигона для тестирования устройств релейной защиты и автоматики в режиме замкнутого цикла.

Проведенный сравнительный анализ характеристик широко используемых в настоящее время усилителей и разработанного экспериментального образца КИМУП показывает, что диапазон выходных трехфазных токов и напряжений БУН и БУТ не уступает (и даже превышает) диапазону рассмотренных усилителей.

В тоже время результаты проведенных тестовых испытания БУТ и БУН показывают адекватность формируемых данными усилителями выходных токов и напряжений: погрешности коэффициентов масштабного преобразования напряжения БУН и тока БУТ не превышают 5%, а угловые погрешности выходного напряжения и тока не превышают 0.1°.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2019-1052 “Исследование влияния спектра процессов в электроэнергетических системах со значительной долей распределенной генерации и возобновляемыми источниками энергии на функционирование устройств релейной защиты и разработка методики ее адекватной настройки”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avalos A., Zamora A., Escamilla O., Paternina M.R.A., Real-time Hardware-in-the-loop Implementation for Power Systems Protection. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition – Latin America (T&D-LA), 18–21 Sept. 2018, Lima, Peru, P. 1–5.
2. Cui Q., El-Arroudi Kh., Još G., Real-time hardware-in-the-loop simulation for islanding detection schemes in hybrid distributed generation systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11. 2017, No. 12, pp. 3050–3056.
3. Penczek A., Stala R., Stawiarski L., Szarek M. Hardware-in-the Loop FPGA-based simulations of switch-mode converters for research and educational purposes. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87. 2011, No. 11, pp. 194–200.
4. Xue Y., Kong D., Guan R., Li J., Taylor A., Zhang X-P., RTDS-based HIL testing platform for complex modern electricity transmission systems. *J. Eng.*, 2018 2018, No. 15, pp. 1315–1320.
5. Nawrot R., Mienski R., Wasiak I., The method of designing the energy storage control algorithm in a prosumer installation using Real-Time Simulator RTDS. *Przegląd Elektrotechniczny*. 94. 2018. № 11. P. 166–169.
6. Dufour Ch., Cense S., Jalili-Marandi V., Bélanger J., Review of state-of-the-art solver solutions for HIL simulation of power systems, power electronic and motor drives, EPE'13 ECCE Europe conference, 3–5 September 2013. Lille. France. P. 1–12.
7. Andreev M., Gusev A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., Bemš J., Králík T., Hybrid real-time simulator of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 34. 2019. № 2. P. 1404–1415.
8. Andreev M., Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králík T., Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 12. 2018. № 1. P. 133–141.
9. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
10. Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Музыченко Н.М. Модуляционные источники питания РЭА. Томск: Радио и связь, 1990.
11. Темчук А.И., Федотов В.А., Идрисов И.К., Семенов В.Д. Импульсно-модуляционный усилитель высокой точности. Научная сессия ТУСУР–2012: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 16–18 мая 2012 г. С. 223–225.
12. Гаязов Д.Р., Темчук А.И., Семенов В.Д., Федотов В.А. Импульсно-модуляционный усилитель тока высокой точности. Итоги НИР кафедры промышленной электроники: материа-

- лы ежегодной науч.-практ. конф. / Вып. 6. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. 99 с.
13. Боровиков Ю.С., Кобзев А.В., Семенов В.Д., Сулайманов А.О., Темчук А.И., Федотов В.А. Усилители сигналов для моделей реального времени // Доклады ТУСУРа. 2013. № 2 (28). С. 70–80.
 14. BRGA.441323.017 RE RETOM-61, Programmable Technical Measuring System. Operations Manual [in Russian] [Online]. Available: <http://dynamics.com.ru/userfiles/file/support/retom-61.pdf> [Accessed: 11.06.2019].
 15. BRGA.441323.035 RE RETOM-71, Programmable Technical Measuring System. Operations Manual [in Russian] [Online]. Available: <http://dynamics.com.ru/userfiles/file/support/retom-71.pdf> [Accessed: 11.06.2019].
 16. Zaytsev B., Shalimov A., Application of the test system RETOM-71 for multi-functional protective relays and systems of relay protection and automation. *Advancement of Relay Protection, Automation and Control in Electric Power Engineering*, 25. 2016. № 4. P. 45–48.
 17. CMS 356 Voltage and current amplifier, Technical-Data [Online]. Available: <https://www.omicronenergy.com/en/products/cms-356/> [Accessed: 11.06.2019].
 18. Power Amplifier for Real Time Digital Simulation, Technical-Data [Online]. Available: http://www.relaytest.com/userfiles/file/Catalogs/RTDS_Amplifier_Brochure.pdf [Accessed: 11.06.2019].

**Pulse Modulating ac Power Amplifiers and Voltages
for the Problems of Adequate Setting of Relay Protection
Devices and Automatics**

R. A. Ufa^{a,*}, V. A. Kabirov^b, M. V. Andreev^a, V. E. Rudnik^a, and V. A. Sulaymanova^a

^a*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

^b*Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, Novgorod, Russia*

^{*}*e-mail: hecn@tpu.ru*

In view of the complexity of the processes and modes of the modern electric power system, the further improvement of relay protection and automation system is relevant. In this regard, there is a need both in the development of new types of relay protection and automation system with adaptive functioning algorithms and in the conducting of relevant studies and tests of adequacy of these algorithms. Due to the well-known specific operation of electric power system, close loop testing is the most effective approach. One of the main elements of this testing scheme is voltage and current amplifiers, which are the link between the source of primary information (model of the power system) and the terminal of protection and automation. This article presents the results of the development and testing of the complex using pulsed modulation amplifiers of alternating current and voltage, implemented on the basis of class D amplifiers. The parameters of the developed voltage and current amplifiers, in particular, the range of three-phase output currents and voltages, and their frequency range, show that the developed complex is not inferior to amplifiers from other manufacturers and surpasses them in mass and dimensions. To demonstrate the adequate work of the developed complex, appropriate test tests were carried out, the deviations of the gain factors, the phase deviations of the output voltage and current were determined, which do not exceed 5% and 0.1°, respectively.

Keywords: electric power system, current and voltage amplifiers, development, test tests, analysis