

УДК 621.315, 621.3.022

Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабилов, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов

## Оценка величины перенапряжения в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока при их размыкании

Производится оценка методов расчета перенапряжения, возникающих в источнике питания испытательного комплекса при прогрузке автоматических выключателей постоянного тока, рассмотрены схемы модульного подключения стабилизаторов тока, построена имитационная модель процесса прогрузки, представлены сравнительные данные результатов расчетов и моделирования, подтверждающие достоверность используемых методов.

**Ключевые слова:** источник питания, стабилизатор тока, автоматический выключатель постоянного тока, индуктивность, перенапряжения, моделирование, MATLAB-Simulink.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-3-210-219

Испытательный комплекс для прогрузки (проверки) автоматических выключателей постоянного тока [1] (в дальнейшем – испытательный комплекс) предназначен для генерации тока мгновенного расщепления с целью проверки защитных характеристик автоматических выключателей в диапазоне токов до 26 кА. Паразитные индуктивности (собственные индуктивности) токоведущих шин, несмотря на их малое значение (сотни нГн) [2], являются причиной возникновения значительных перенапряжений при размыкании автоматических выключателей постоянного тока. Измерение величины перенапряжений на паразитных индуктивностях затруднено из-за помех, возникающих при «резком» обрыве тока в диапазоне до 26 кА. Эти перенапряжения способны вывести из строя полупроводниковые приборы, установленные в выходных цепях импульсных стабилизаторов тока с микропроцессорной системой управления [3] (в дальнейшем – стабилизаторы тока).

Поэтому расчет величины перенапряжений, возникающих в источнике питания испытательного комплекса (ИПИК) при размыкании автоматических выключателей постоянного тока, является актуальной задачей.

### Быстродействующий автоматический выключатель постоянного тока как нагрузка источника питания испытательного комплекса

Процесс прогрузки быстродействующего (токоограничивающего) автоматического выключателя постоянного тока (АВ), в соответствии с ГОСТ 2585–81 [4], производится по схеме, представленной на рис. 1, а. ИПИК через силовые шины с паразитным сопротивлением  $R_{Ш}$  и индуктивностью  $L_{Ш}$  подключается к замкнутым контактам АВ (QF), после чего ИПИК подает напряжение, обеспечивающее заданную скорость нарастания тока  $I(t)$ . Через время  $t_0$  ток замкнутых контактов АВ достигает величины  $I_{уст}$  (ток уставки, при котором контакты АВ должны разомкнуться). Из-за конечного значения собственного времени отключения, длительность которого обусловлена конструктивными особенностями АВ и находится в диапазоне от 1,5 до 5 мс, ток  $I(t)$  продолжает нарастать в течение времени  $t_1$ ,

достигая тока размыкания  $I_{разм}$ . После этого контакты АВ начинают размыкаться, ток  $I(t)$  ограничивается непрерывно увеличивающимся сопротивлением электрической дуги и спадает до нуля в течение времени  $t_2$  (время гашения дуги). Полное время отключения быстродействующего (токоограничивающего) автоматического выключателя постоянного тока определяется соотношением  $t_{откл} = t_1 + t_2$  и находится в диапазоне от 10 до 30 мс [5]. Из-за наличия паразитной индуктивности токоведущих шин ( $L_{Ш}$ ) напряжение  $U(t)$  (рис. 1, а) размыкающихся контактов АВ, на интервале времени  $t_2$ , сначала увеличивается до максимального значения  $U_{ABmax}$ , а затем спадает до напряжения холостого хода ИПИК ( $U_{xx}$ ).

На рис. 1, б показана схема замещения процесса размыкания АВ, на которой ИПИК представлен идеальным источником напряжения ( $E_{И}$ ), внутренним сопротивлением  $R(R_{И})$ , паразитной индуктивностью ( $L_{И}$ ) внутренних токоведущих шин и идеальным диодом ( $VD_{И}$ ). Замкнутые контакты АВ представлены изменяющимся сопротивлением ( $R_{авт}(t)$ ), а подводящие токоведущие шины – активным сопротивлением ( $R_{Ш}$ ) и индуктивностью ( $L_{Ш}$ ).

Максимальная величина перенапряжений, возникающих при размыкании АВ, зависит от множества электрофизических и конструктивных параметров АВ, но в то же время не превышает максимально возможного значения [6–7]:

$$U_{\max} = I_{\text{разм}} \times \sqrt{L_{Ш}/C_{Ш}}, \quad (1)$$

где  $C_{Ш}$  – эквивалентная паразитная емкость шин, относительно контактов размыкающегося АВ

Формула (1) получена из условия отсутствия потерь в контуре, поэтому реальная перенапряжений на контактах АВ будет значительно меньше, т.к. энергия, накопленная в паразитных индуктивностях, рассеивается в электрической дуге, возникающей между размыкающимися контактами АВ.

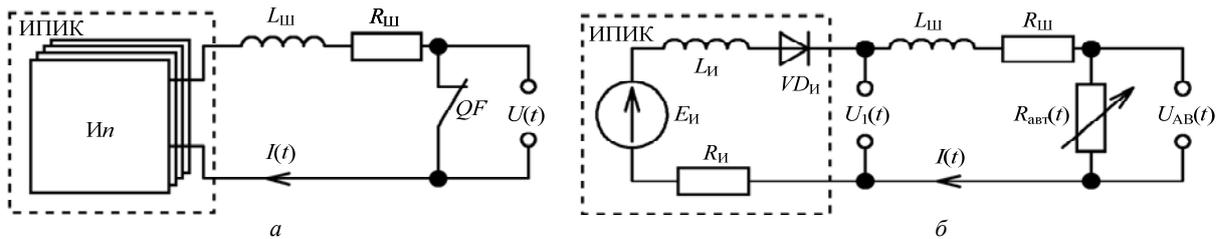


Рис. 1. Схема прогрузки автоматического выключателя постоянного тока – а; эквивалентная схема прогрузки автоматического выключателя постоянного тока – б

Интуитивно понятно, что скорость расхождения контактов АВ можно имитировать законом изменения сопротивления  $R_{авт}(t)$ . В первом приближении можно взять линейный закон изменения сопротивления

$$R_{авт}(t) = R_{п} + \frac{R_{xx}}{\Delta t} \times t = R_{п} + S_R \times t, \quad (2)$$

где  $R_{п}$  – сопротивление замкнутых контактов АВ;  $R_{xx}$  – сопротивление холостого хода (разомкнутых контактов) АВ;  $\Delta t$  – время, в течение которого сопротивление размыкающихся контактов АВ изменяется от  $R_{п}$  до  $R_{xx}$ ;  $S_R = R_{xx}/\Delta t$  – скорость (крутизна) изменения сопротивления;

Результаты моделирования показывают, что при  $U_{xx}=500\text{В}$ ,  $L_{ш}=1\text{мГн}$ ,  $I_{разм}=26\text{кА}$ ,  $R_{п}=U_{xx}/I_{разм}\text{ Ом}$ ,  $S_R \approx 1,66\text{--}3,33\text{ кОм/с}$ , время спада тока ( $I(t)$ ) (см. рис. 1, б) до нуля, находится в диапазоне 5 мс, что сопоставимо с экспериментальными данными [5]. В то же время величина перенапряжения много меньше максимального значения, рассчитанного по формуле (1). Это говорит о том, что реальное  $S_R \gg 3,33\text{ кОм/с}$ .

**Оценка перенапряжений при прогрузке автоматического выключателя постоянного тока**

Дифференциальное уравнение, соответствующее эквивалентной схеме (см. рис. 1, б), при размыкании АВ (падение тока) и начальных условиях  $I(0)=I_{разм}$  будет иметь вид:

$$(R_{авт}(t) + R_{и} + R_{ш}) \times I(t) + (L_{и} + L_{ш}) \times I'(t) = E_{и}. \quad (3)$$

Приведем (3) к нормальной форме [8]:

$$I'(t) + \left( \frac{R_{\Sigma}(t)}{L_{\Sigma}} \right) \times I(t) = \frac{E_{и}}{L_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где  $R_{\Sigma}(t) = R_{авт}(t) + R_{и} + R_{ш}$  – суммарное сопротивление контура;  $L_{\Sigma} = L_{и} + L_{ш}$  – суммарная индуктивность контура.

Решение уравнения (4) методом Бернулли [8] имеет вид

$$I(t) = \left( \int \left[ \frac{E_{и}}{L_{\Sigma}} \times e^{\int \left[ \frac{R_{\Sigma}(t)}{L_{\Sigma}} \right] dt} dt + C_{инт} \right) \times e^{-\int \left[ \frac{R_{\Sigma}(t)}{L_{\Sigma}} \right] dt}, \quad (5)$$

где  $C_{инт}$  – постоянная интегрирования, которая может быть определена из начальных условий [9] ( $C_{инт} = I_{разм}$ ).

Уравнение (5) решалось в символьном процессоре Mathcad, и его решение имеет вид [10]

$$I(t) = e^{-\frac{R_{\Sigma}^2(t)}{2 \times S_R \times L_{\Sigma}}} \times \left( C_{инт} + \frac{\sqrt{\pi} \times E_{и} \times \operatorname{erf} \left( R_{\Sigma}(t) \times \sqrt{\frac{1}{2 \times S_R \times L_{\Sigma}}} \right)}{2 \times S_R \times L_{\Sigma} \times \sqrt{\frac{1}{2 \times S_R \times L_{\Sigma}}} \right), \quad (6)$$

где  $\operatorname{erf}$  – интеграл ошибок (специальная функция Mathcad).

Тогда напряжение на размыкающихся контактах АВ будет определяться выражением

$$U_{AB}(t) = R_{авт}(t) \times I(t). \quad (7)$$

Для того чтобы найти напряжение на выводах ИПИК ( $U_1(t)$ ), необходимо найти производную тока  $I(t)$ , которая, судя по выражениям (5), (6), будет иметь громоздкий вид:

$$U_1(t) = E_{и} - I(t) \times R_{и} - L_{и} \times I'(t). \quad (8)$$

Однако напряжение  $U_1(t)$  можно найти, если учесть реальное соотношение величин в эквивалентной схеме, представленной на рис. 1, б:  $E_{и} \ll U_{ABмакс}$ ,  $R_{ш} \ll R_{и}$ , а  $I_{разм} \times R_{и} < E_{и}$ . Таким образом, исключая из эквивалентной схемы (см. рис. 1, б)  $E_{и}, R_{и}, R_{ш}$ , можно получить «приближенное» соотношение

$$U_1(t) = U_{AB}(t) \times \frac{L_{и}}{L_{и} + L_{ш}}, \quad (9)$$

На рис. 2 представлены диаграммы токов, напряжений и сопротивления для эквивалентной схемы прогрузки АВ (см. рис. 1, б) при размыкании АВ (падение тока) при следующих параметрах:  $E_{и}=5\text{ В}$ ,  $I_{разм}=26\text{ кА}$ ,  $R_{и}=E_{и}/I_{разм}\text{ Ом}$ ,  $L_{и}=1\text{ нГн}$ ,  $L_{ш}=100\text{ нГн}$ ,  $R_{ш}=0\text{ Ом}$ ,  $R_{п}=0\text{ Ом}$ ,  $S_R \approx 3,33\text{ кОм/с}$ .

Из представленных диаграмм (рис. 2) видно, что в процессе размыкания АВ на его контактах возникает перенапряжение, значительно превышающее максимальное напряжение ИПИК.

Для получения более точного результата моделирования процесса размыкания АВ были исследованы другие законы изменения сопротивления АВ, в частности:

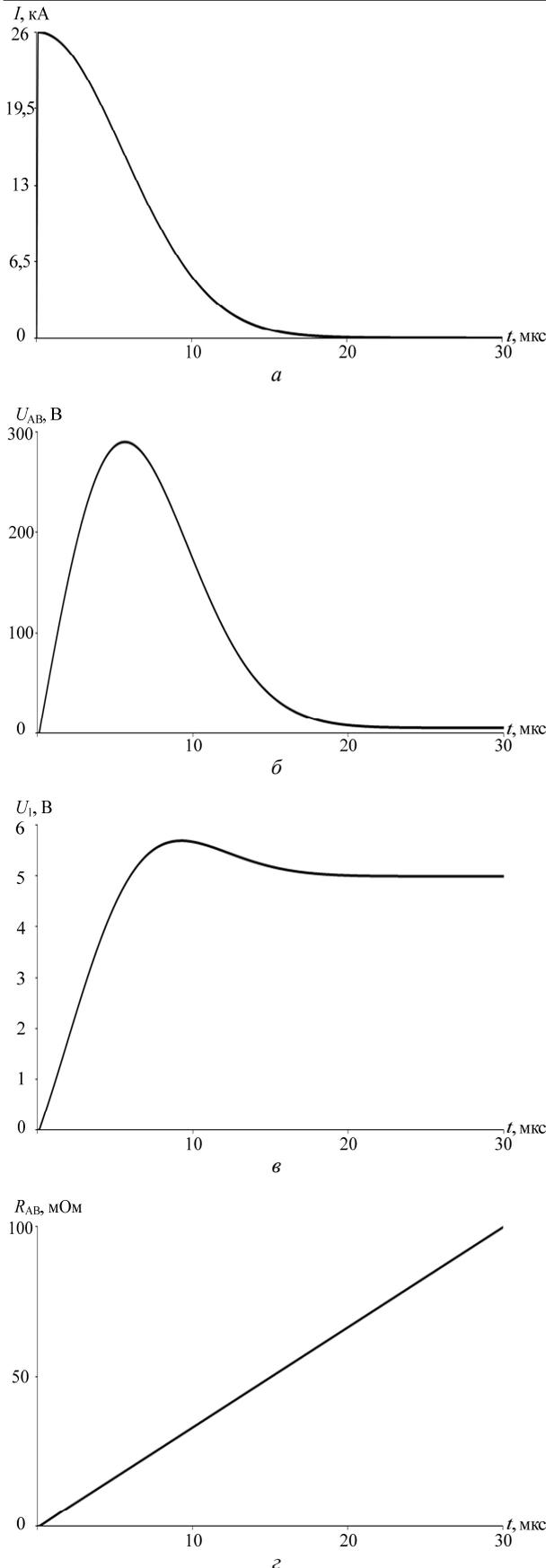


Рис. 2. Ток АВ  $I(t)$  – а. Напряжение АВ  $U_{AB}(t)$  – б.  
 Напряжение на выводах ИПИК  $U_1(t)$  – в.  
 Сопротивление АВ  $R_{авт}(t)$  – з

$$R_{авт\_экс}(t) = R_{п} \times e^{\ln\left(\frac{R_{xx}}{R_{п}}\right) \times \left(\frac{t}{\Delta t}\right)}, \quad (10)$$

$$R_{авт\_кв}(t) = R_{п} + R_{xx} \times \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^2, \quad (11)$$

$$R_{авт\_куб}(t) = R_{п} + R_{xx} \times \left(\frac{t}{\Delta t}\right)^3. \quad (12)$$

Однако другие законы изменения сопротивления АВ (10)–(12) «качественно» не влияют на процесс размыкания АВ (см. рис. 2) и в сущности могут быть сведены к линейному закону изменения сопротивления АВ (2), который позволяет получить «приближенное» решение, удобное в использовании.

Для «точной» оценки величины перенапряжений при линейном законе изменения сопротивления АВ (2) необходимо найти время переходного процесса  $t_{пп}$  (время падения тока), решив уравнение

$$I(t_{пп}) = \frac{E_{И}}{R_{xx}} \approx I_{разм} \times \delta_0, \quad (13)$$

где  $\delta_0$  – погрешность приближения тока к нулевому значению.

Величину перенапряжений на АВ с учетом (2), (5) и (13) можно оценить по формуле.

$$U_{ABмакс} \approx \frac{\int_0^{t_{пп}} I(t) dt}{t_{пп}} \times \frac{\int_0^{t_{пп}} R_{авт}(t) dt}{t_{пп}} \approx I_{ср} \times R_{авт\_ср}, \quad (14)$$

где  $I_{ср}$  и  $R_{авт\_ср}$  – величины тока и сопротивления, усредненные на интервале  $t_{пп}$  переходного процесса.

Расхождение результатов моделирования (см. рис. 2) и расчетов (14) не превышает 2% при  $\delta_0 = 0,05$ . Для упрощения расчета величиной  $E_{И}$  можно пренебречь, т.к. она значительно меньше величины перенапряжения на  $R_{авт}$ . Тогда уравнение (5) примет вид

$$(R_{авт}(t) + R_{И}) \times I(t) + L_{Ш} \times I'(t) = 0. \quad (15)$$

Решение уравнения (15) имеет вид [8]

$$I(t) = C_{инт} \times e^{-\int \left[ \frac{R_{\Sigma}(t)}{L_{\Sigma}} \right] dt} = C_{инт} \times e^{-\frac{R_{\Sigma}^2(t)}{2 \times S_R \times L_{\Sigma}}}. \quad (16)$$

Уравнение (16) уступает в точности уравнению (5), но упрощает расчет величины перенапряжения для схемы, представленной на рис. 1, б.

**Варианты модульного построения источника питания испытательного комплекса**

Модульный принцип построения ИПИК (см. рис. 1, а) и адаптивная цифровая система управления [1] позволяют изменять максимальный ток нагрузки АВ за счет изменения количества параллельно работающих стабилизаторов тока. Но при увеличении количества стабилизаторов тока возрастает сложность конструктивного выполнения и количество токоведущих шин и как следствие увеличивается их паразитная индуктивность [2], которая напрямую

влияет на величину перенапряжения. Кроме того, на величину перенапряжения влияет схема подключения стабилизаторов тока друг к другу.

При «кольцевой» схеме подключения (рис. 3, а) каждый стабилизатор тока (И1–И $n$ ) соединяется непосредственно с выходом источника питания испытательного комплекса (т.е. параллельно) токоведущими шинами с паразитными индуктивностями ( $L_{Ш1.1}, L_{Ш1.2} - L_{Шn-1.1}, L_{Шn-1.2}$ ), а АВ подключается к выходу источника питания испытательного комплекса токоведущими шинами с паразитными индуктивностями ( $L_{B1}$  и  $L_{B2}$ ). При «лестничной» схе-

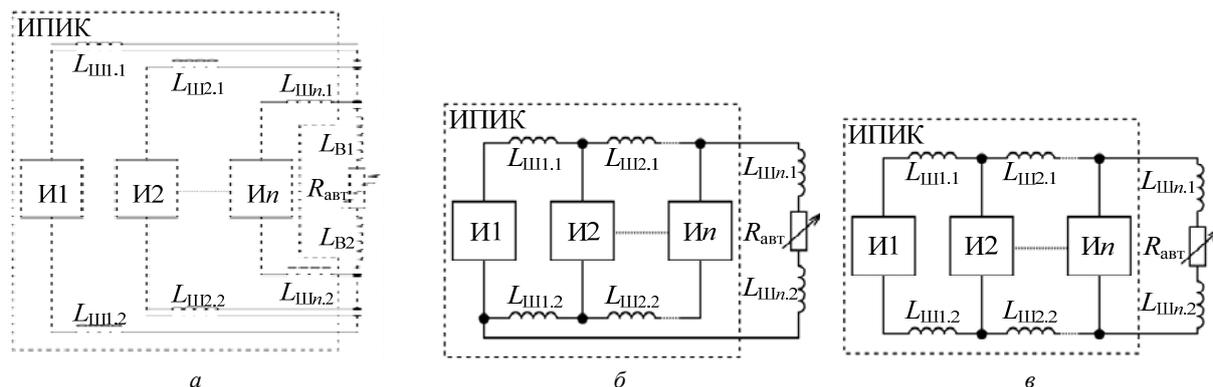


Рис. 3. «Кольцевая» схема подключения стабилизаторов тока – а; «лестничная» схема подключения стабилизаторов тока – б; «линейная» схема подключения стабилизаторов тока – в

С точки зрения уменьшения величины перенапряжений, возникающих на стабилизаторах тока (И1–И $n$ ) при размыкании АВ, наиболее подходящей является «кольцевая» схема подключения. При «кольцевой» схеме подключения стабилизаторы тока (И1–И $n$ ) могут располагаться вокруг АВ или подключаться непосредственно к его контактам отдельными «согласованными» токоведущими шинами (с равными паразитными индуктивностями), что позволяет устранить перенапряжения на стабилизаторах тока (И1–И $n$ ) по аналогии со схемой, представленной на рис. 1. Основным недостатком «кольцевой» схемы подключения являются сложность конструктивного выполнения «согласованных» токоведущих шин (иначе возникают перенапряжения на стабилизаторах тока при размыкании АВ), а также трудности расположения стабилизаторов тока в одной стойке (например, Rittal DK-TS 7820.730) или ограниченный доступ к АВ (при расположении стабилизаторов тока вокруг АВ). При «лестничной» схеме подключения уменьшается сложность конструктивного выполнения токоведущих шин, что позволяет располагать стабилизаторы тока в одной стойке, но растёт величина перенапряжения на стабилизаторах тока при размыкании АВ. При «линейной» схеме подключения значительно уменьшается сложность конструктивного выполнения токоведущих шин, но, как и при «лестничной» схеме подключения, растёт величина перенапряжения на стабилизаторах тока при размыкании АВ.

Так как «линейная» схема подключения наиболее простая (с точки зрения конструктивного вы-

полнения) и является частным случаем выполнения «магистралей» источника питания испытательного комплекса [2], рассмотрим процесс прогрузки АВ при работе нескольких стабилизаторов тока при «линейной» схеме подключения (см. рис. 3, в).

полнения) и является частным случаем выполнения «магистралей» источника питания испытательного комплекса [2], рассмотрим процесс прогрузки АВ при работе нескольких стабилизаторов тока при «линейной» схеме подключения (см. рис. 3, в).

#### Моделирование процесса прогрузки автоматического выключателя постоянного тока при «линейной» схеме подключения

Для имитационного моделирования процесса прогрузки АВ подходит среда моделирования MATLAB-Simulink [12]. Моделирование (рис. 4, а) проводится для 4 стабилизаторов тока при «линейной» схеме подключения (см. рис. 3, в), с использованием библиотек Simulink и SimPowerSystems.

Стабилизатор тока (рис. 4, б) реализуется отдельной подсистемой (Subsystem) [13] с помощью блока управляемого источника напряжения ( $Ei$ , см. рис. 4), внутреннего сопротивления ( $Ri$ ), идеального диода ( $VDi$ ) и двунаправленных портов физического подключения («шина+» и «шина-»). Требуемая величина напряжения стабилизатора тока задается через входной порт 1 ( $E$ ), а значения выходного напряжения/тока измеряются блоком вольтметра / амперметра (С.М./V.М.) и передаются на выходной порт 2/1 (напряжение/ток). Так как  $L_{и} \ll L_{ш}$ , при моделировании величина  $L_{и}$  не учитывается.

Линейно нарастающее сопротивление АВ (рис. 4, в) реализуется отдельной подсистемой с помощью блока управляемого источника напряжения (С.V.S., см. рис. 4), амперметра (С.М.), блока умножения ( $P$ ) и двунаправленных портов физического подключения («+» и «-»). Требуемая величина со-

противления задается через входной порт 1 ( $R$ ) внешним блоком «Ramp» (см. рис. 4, а) и ограничивается блоком насыщения ( $S$ ) в заданных пределах.

Моделирование производится при  $E_i = 5$  В,  $I_{\text{разм}} = 4000$  А,  $L1-L4 = 100$  нГн [2],  $L_M = 0$  Гн,  $R_{\text{ш}} = 0$  Ом,  $R_{\text{п}} = 0$  Ом,  $S_R \approx 200$  кОм/с,  $R_f = E_i / I_{\text{разм}}$ , Ом,  $t_{\text{разм}} = 5$  мс. Величина  $S_R$  целенаправленно увеличена для имитации более «быстро» процесса размыкания АВ.

До момента времени  $t_{\text{разм}}$  в каждом стабилизаторе протекает ток 4 кА (рис. 5, а), в паразитных индуктивностях  $L1, L2, L3, L4$  соответственно токи 4, 8, 12, 16 кА (см. рис. 5, б), напряжение на стабилизаторах тока (см. рис. 5, в) не превышает величины  $E_i = 5$  В, а напряжение на паразитных индуктивностях (см. рис. 5, г) равно нулю. В момент времени  $t_{\text{разм}}$  контакты АВ начинают расходиться, а сопротивление межконтактного промежутка возрастает.

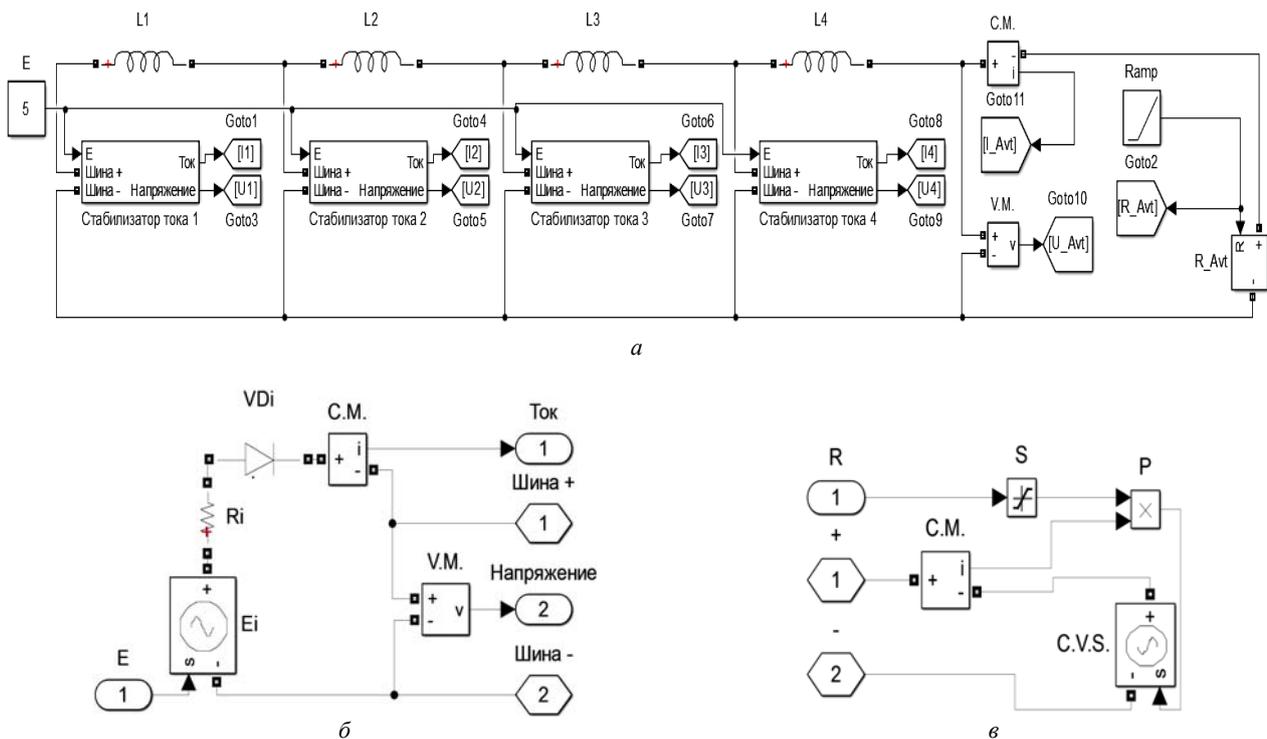


Рис. 4. Моделирование в среде MATLAB-Simulink – а; стабилизатор тока – б; управляемое сопротивление – в

На интервале времени  $t_{\text{пп4}} - t_{\text{разм}} \approx 0,5$  мкс (см. рис. 5) ЭДС самоиндукции индуктивности  $L4$  «поддерживает» токи остальных индуктивностей, при этом ток стабилизатора 4 спадает до нуля, а перенапряжение возникает только на контактах АВ. В момент времени  $t_{\text{пп4}}$  энергии индуктивности  $L4$  становится недостаточно для поддержания тока в индуктивности  $L3$  на уровне 12 кА, и ЭДС самоиндукции «перераспределяется» между индуктивностями  $L4-L3$ , при этом на запертом внутреннем диоде ( $VDi$ ) стабилизатора 4 возникает перенапряжение ( $U_4(t_{\text{пп4}})$ ), (см. рис. 5, в), обусловленное ЭДС самоиндукции индуктивности  $L3$ .

На интервале времени  $t_{\text{пп3}} - t_{\text{пп4}} \approx 1$  мкс (см. рис. 5) ЭДС самоиндукции индуктивностей  $L4-L3$  «поддерживает» токи остальных индуктивностей, при этом ток стабилизатора 3 спадает до нуля. В момент времени  $t_{\text{пп3}}$  энергии индуктивностей  $L4-L3$  становится недостаточно для поддержания тока в индуктивности  $L2$  на уровне 8 кА, и ЭДС самоиндукции «перераспределяется» между индуктивно-

стями  $L4-L2$ , при этом на запертом внутреннем диоде ( $VDi$ ) стабилизатора 3 возникает перенапряжение ( $U_3(t_{\text{пп3}})$ ), (см. рис. 5, в), обусловленное ЭДС самоиндукции индуктивности  $L2$ .

На интервале времени  $t_{\text{пп2}} - t_{\text{пп3}} \approx 1,7$  мкс (см. рис. 5) ЭДС самоиндукции индуктивностей  $L4-L2$  «поддерживает» ток индуктивности  $L1$ , при этом ток стабилизатора 2 спадает до нуля. В момент времени  $t_{\text{пп2}}$  энергии индуктивностей  $L4-L2$  становится недостаточно для поддержания тока в индуктивности  $L1$  на уровне 4 кА, и ЭДС самоиндукции «перераспределяется» между индуктивностями  $L4-L1$ , при этом на запертом внутреннем диоде ( $VDi$ ) стабилизатора 2 возникает перенапряжение ( $U_2(t_{\text{пп2}})$ ) (см. рис. 5, в), обусловленное ЭДС самоиндукции индуктивности  $L1$ .

С момента времени  $t_{\text{пп2}}$  (см. рис. 5) до момента времени  $t_{\text{разм}} + \Delta t$  ток АВ спадает до уровня  $E/R_{\text{xx}}$  и распределяется между всеми стабилизаторами тока, при этом на стабилизаторе 1 не возникает перенапряжения ( $U_1$ ), (см. рис. 5, в).

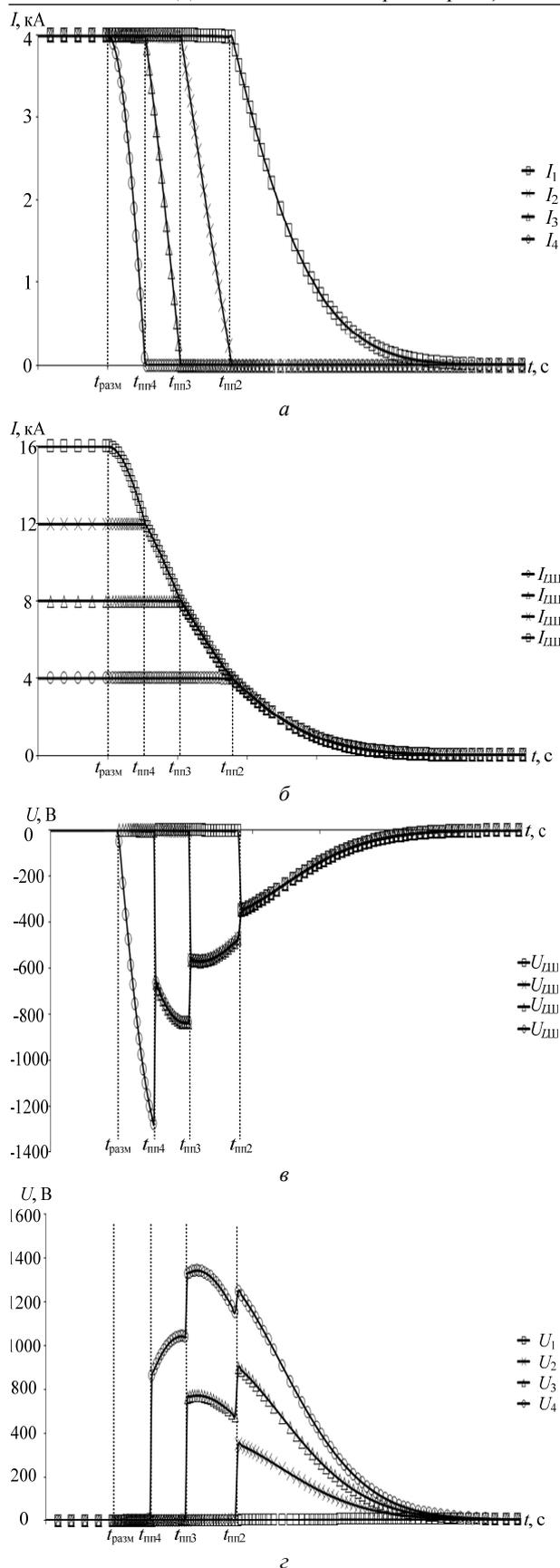


Рис. 5. Токи стабилизаторов 1–4 – а;  
токи индуктивностей L1–L4 – б;  
напряжения на индуктивностях L1–L4 – в;  
напряжения на стабилизаторах 1–4 – з

Несмотря на то, что имитационное моделирование в среде MATLAB-Simulink позволяет наглядно оценить перенапряжения при прогрузке АВ практически для любой схемы подключения (см. рис. 3), при увеличении числа стабилизаторов тока значительно усложняется имитационная модель. Поэтому наряду с имитационным моделированием можно пользоваться аналитическими методами расчета для оценки перенапряжений при прогрузке АВ.

**Оценка перенапряжений при прогрузке автоматического выключателя постоянного тока при «линейной» схеме подключения**

В соответствии с обозначениями, принятыми при описании АВ (2), «линейной» схемой подключения (см. рис. 3, б) и (5) эквивалентную постоянную времени тока, протекающего в *n*-й суммарной паразитной индуктивности токоведущих шин, на *n*-м интервале времени, учитывая деление этого тока между *n* стабилизаторами тока, можно рассчитать по формуле

$$\tau_{In}(n,t) = \int \left[ \frac{R_{И} + R_{авт}(t)}{n \sum_{i=n}^{n_{max}} L_{ш\_n}(i)} \right] dt, \quad (17)$$

где *n* – номер стабилизатора тока; *n<sub>max</sub>* – максимальное количество подключенных стабилизаторов тока; *L<sub>ш\\_n</sub>(n) = L<sub>шn.1</sub> + L<sub>шn.2</sub>* – суммарная паразитная индуктивность *n*-х токоведущих шин, расположенная на месте *L<sub>шn.1</sub>*.

Для оценки величины перенапряжений необходимо найти время переходного процесса *n*-й суммарной паразитной индуктивности решив уравнение

$$\left( \int \left[ \frac{E_{И}}{\sum_{i=n}^{n_{max}} L_{ш\_i}} \times e^{[\tau_{In}(n,t_{пп}(n))]dt} dt + C_{In}(n) \right) \times e^{-[\tau_{In}(n,t_{пп}(n))]dt} = I_{разм} \times (n-1), \quad (18)$$

где *t<sub>пп</sub>(n)* – время переходного процесса тока *n*-й суммарной паразитной индуктивности; *C<sub>In</sub>(n)* – *n*-я постоянная интегрирования.

Обозначив левую часть уравнения (18) величиной *I<sub>x</sub>(n)* постоянную интегрирования можно рассчитать по формуле:

$$C_{In}(n) = \frac{n \times I_{разм}}{I_x(n)}, \quad (19)$$

где *I<sub>x</sub>(n)* – левая часть уравнения (18).

Уравнения (18) и (19) рассчитываются поочередно, начиная с *n = n<sub>max</sub>*, при этом

$$C_{In}(n_{max}) = \frac{n_{max} \times I(t_{разм})}{I_x(n_{max})} = n_{max} \times I(t_{разм}). \quad (20)$$

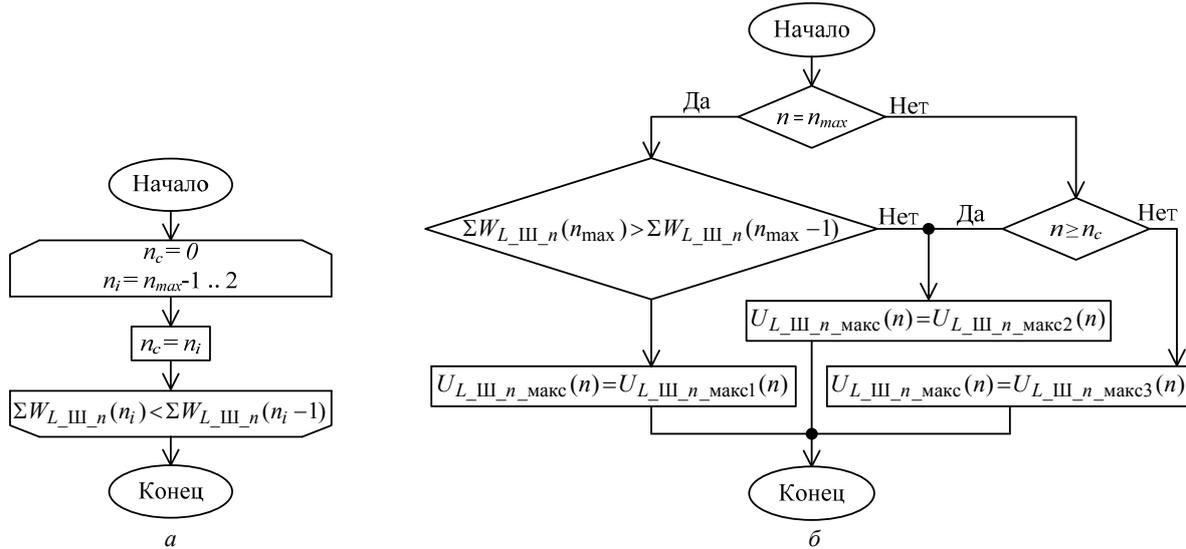


Рис. 6. Алгоритм расчета  $n_c$  – а; алгоритм расчета  $U_{L\_III\_n\_макс}(n)$  – б

После расчета всех длительностей переходных процессов (18) и постоянного интегрирования (19) ток  $n$ -й суммарной паразитной индуктивности рассчитывается по формуле

$$I_{L\_III\_n}(n, t) = \begin{cases} n \times I_{разм}, & t \leq t_{пп}(n), \\ I_x(n), & t > t_{пп}(n). \end{cases} \quad (21)$$

Энергия, запасенная в  $n$ -й суммарной паразитной индуктивности на момент размыкания АВ, рассчитывается по формуле:

$$W_{L\_III\_n}(n) = \frac{L_{III\_n}(n) \times I_{L\_III\_n}^2(n, t_{разм})}{2}. \quad (22)$$

Суммарная энергия, запасенная в паразитных индуктивностях контура протекания тока  $n$ -го стабилизатора тока, рассчитывается по формуле

$$\Sigma W_{L\_III\_n}(n) = (n_{max} - n + 1) \times W_{L\_III\_n}(n). \quad (23)$$

Для оценки величины перенапряжений на паразитных индуктивностях необходимо найти номер контура протекания тока  $n$ -го стабилизатора тока ( $n_c$ ), в котором суммарная энергия (23) не прекращает расти, алгоритм расчета номера контура  $n_c$  представлен на рис. 6, а.

Величина перенапряжения на суммарной паразитной индуктивности, с учетом рассчитанного значения  $n_c$  (см. рис. 6, а), может быть рассчитана по одной из трех формул (24)–(26):

$$U_{L\_III\_n\_макс1}(n) = I_{L\_III\_n}(n_c, t_{пп}(n_c)) \times \left( \frac{R_{И}}{n} + R_{авт}(t_{пп}(n_c)) \right) \times \frac{L_{III\_n}(n_{max})}{\sum_{i=n_c}^{n_{max}} L_{III\_n}(i)}, \quad (24)$$

где  $U_{L\_III\_n\_макс1}(n)$  – величина перенапряжения на суммарной паразитной индуктивности, рассчитанная первым способом;

$$U_{L\_III\_n\_макс2}(n) = I_{L\_III\_n}(n, t_{пп}(n-1)) \times \left( \frac{R_{И}}{n} + R_{авт}(t_{пп}(n-1)) \right) \times \frac{L_{III\_n}(n)}{\sum_{i=n}^{n_{max}} L_{III\_n}(i)}, \quad (25)$$

где  $U_{L\_III\_n\_макс2}(n)$  – величина перенапряжения на суммарной паразитной индуктивности, рассчитанная вторым способом;

$$U_{L\_III\_n\_макс3}(n) = I_{L\_III\_n}(n, t_{пп}(n)) \times \left( \frac{R_{И}}{n} + R_{авт}(t_{пп}(n)) \right) \times \frac{L_{III\_n}(n)}{\sum_{i=n}^{n_{max}} L_{III\_n}(i)}, \quad (26)$$

где  $U_{L\_III\_n\_макс3}(n)$  – величина перенапряжения на суммарной паразитной индуктивности, рассчитанная третьим способом.

С учетом (24)–(26) и рассчитанного значения  $n_c$  (см. рис. 6, а), величина перенапряжения на  $n$ -ой суммарной паразитной индуктивности ( $U_{L\_III\_n\_макс}(n)$ ) рассчитывается по алгоритму, представленному на рис. 6, б.

Для расчета величины перенапряжений на стабилизаторах тока необходимо найти среднее значение суммарной энергии, запасенной в паразитных индуктивностях контура протекания тока  $n$ -го стабилизатора тока, которое рассчитывается по формуле

$$W_{0.5}(n) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Sigma W_{L\_III\_n}(i)}{n}, \quad (27)$$

Величина перенапряжения на  $n$ -м стабилизаторе тока ( $U_{n\_макс}(n)$ ) с учетом (27) и рассчитанных значений  $U_{L\_III\_n\_макс}(n)$  (рис. 6, б) рассчитывается по алгоритму, представленному на рис. 7.

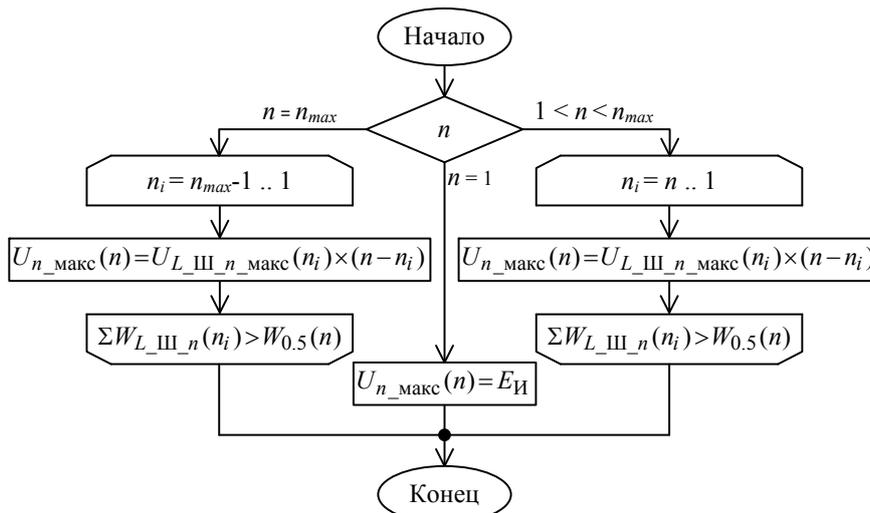


Рис. 7. Алгоритм расчета перенапряжения на n-м стабилизаторе тока ( $U_{n\_макс}(n)$ )

Описанные алгоритмы расчета (17)–(27) (см. рис. 6 и 7) можно «автоматизировать» (например, в программе Mathcad с помощью инструментов панели «Программирование») и адаптировать для расчета перенапряжений при других схемах подключения (например, см. рис. 3, б), но это выходит за рамки данной статьи.

В табл. 1 представлены данные трех экспериментов (№ 1–3) по оценке перенапряжений при прогрузке АВ при линейной схеме подключения (см. рис. 3, в). В первом эксперименте паразитные индуктивности имеют одинаковое значение [2] и с ростом номера стабилизатора тока (n) растет величина  $U_{L\_III\_n\_макс}(n)$ . Это обусловлено тем, что ЭДС самоиндукции паразитных индуктивностей соединяется последовательно и прикладывается к запертым внутренним диодам стабилизаторов тока.

Таблица 1  
Перенапряжения при прогрузке автоматического выключателя постоянного тока при «линейной» схеме подключения

№	n	$L_{III\_n}(n)$ , мкГн	$U_{n\_макс}(n)$ , В		Расхождение, %
			Рассчитанное значение	Результат моделирования	
1	1	0,1	5	5	0
	2		357,89	355,34	0,71
	3		715,78	710,64	0,72
	4		1074	1142,52	6
2	1	0,1	5	5	0
	2		239,6	238,4	0,5
	3		479,2	476,67	0,53
	4	1	718,8	714,94	0,54
3	1	0,1	5	5	0
	2		90,62	89,8	0,9
	3		181,24	179,43	1
	4	10	271,87	269,06	1

Во втором и третьем эксперименте для имитации дополнительной индуктивности выводов ИПИК величина «последней» паразитной индуктивности (n = 4) задана значительно больше остальных, при

этом с её ростом наблюдается уменьшение величины  $U_{L\_III\_n\_макс}(n)$ . Это обусловлено тем, что ЭДС самоиндукции «перераспределяется» между паразитными индуктивностями пропорционально их величине (24)–(26). Таким образом, «последняя» паразитная индуктивность «забирает» большую часть ЭДС самоиндукции, которая прикладывается к размыкающимся контактам АВ.

Таблица 2  
Перенапряжения при прогрузке автоматического выключателя постоянного тока при «лестничной» схеме подключения

№	n	$L_{III\_n}(n)$ , мкГн	$U_{n\_макс}(n)$ , В
1	1	0,1	391,2
	2		5
	3		5
	4		391,2
2	1	0,1	192,8
	2		5
	3		5
	4	1	192,8
3	1	0,1	64,8
	2		5
	3		5
	4	10	64,8

Таблица 3  
Перенапряжения при прогрузке автоматического выключателя постоянного тока при «кольцевой» схеме подключения

№	n	$L_{III\_n}(n)$ , мкГн	$U_{n\_макс}(n)$ , В
1	1	0,1	5
	2		5
	3		5
	4		5
2	1	0,09	208,28
	2	0,095	133,67
	3	0,1	79,37
	4	0,11	5
3	1	0,08	407,52
	2	0,1	185,88
	3	0,11	80,86
	4	0,12	5

Данные, представленные в табл. 1, подтверждают хорошую сходимость результатов расчетов и моделирования, расхождение величины  $U_{n\_макс}(n)$  не превышает 6%. На основании этого сравнения описанные алгоритмы расчета можно считать достоверными.

В табл. 2 представлены результаты моделирования при «лестничной» (см. рис. 3, б) схеме подключения для трех экспериментов по аналогии с табл. 1. Перенапряжения не возникают только на двух «центральных» стабилизаторах тока ( $n = 2-3$ ), однако с удалением от «центра» напряжение  $U_{L\_ш\_n\_макс}(n)$  начинает расти. При увеличении паразитной индуктивности выводов ИПИК наблюдается уменьшение величины  $U_{L\_ш\_n\_макс}(n)$ , как и в «лестничной» схеме подключения.

В табл. 3 представлены результаты моделирования при «кольцевой» (см. рис. 3, а) схеме подключения для трех экспериментов. В первом эксперименте паразитные индуктивности имеют одинаковое значение и перенапряжений не возникает ( $U_{L\_ш\_n\_макс}(n) \leq E_{и}$ ). Во втором и третьем эксперименте для имитации «несогласованных» токоведущих шин заданы разные значения паразитных индуктивностей. При этом перенапряжения не возникают только на стабилизаторе тока с наибольшей паразитной индуктивностью токоведущих шин.

#### Заключение

Результаты моделирования и расчетов показывают, что при параллельном включении стабилизаторов тока источником перенапряжений является внутренняя индуктивность (как при работе одного стабилизатора тока), а паразитные индуктивности токоведущих шин, с помощью которых стабилизаторы тока подключаются к автоматическому выключателю постоянного тока. Величина перенапряжений может быть использована при выборе полупроводниковых приборов, устанавливаемых в выходной цепи стабилизаторов тока. Но часто высоковольтные полупроводниковые приборы (например, транзисторы, используемые в качестве синхронных выпрямителей [3]) обладают высоким сопротивлением открытого канала, и не могут быть использованы в диапазоне токов от 4 до 26 кА, т.к. значительно уменьшают КПД источника питания испытательного комплекса. Поэтому полученные значения паразитных индуктивностей [2] и величина перенапряжений (см. табл. 1–3) будут использованы при разработке специальных защитных цепей стабилизаторов тока, которые позволят использовать низковольтные полупроводниковые приборы и сохранять их работоспособность при воздействии ЭДС самоиндукции паразитных индуктивностей внешних (по отношению к стабилизаторам тока) токоведущих шин.

Разработанные алгоритмы расчета позволяют оценить величину перенапряжений, возникающих в источнике питания испытательного комплекса при размыкании автоматических выключателей посто-

янного тока в зависимости от схемы подключения стабилизаторов тока и их порядкового номера ( $n$ ).

#### Литература

1. Винтоняк Н.П. Испытательный комплекс для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока // Научная сессия ТУСУР–2016. – 2016. – Т. 2. – С. 237–239.
2. Винтоняк Н.П. Оценка величины паразитных индуктивностей токоведущих шин в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабиров и др. // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 4(19). – С. 129–132.
3. Винтоняк Н.П. Программное обеспечение ячейки испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянным током / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Электронные средства и системы управления. – 2015. – Ч. 1. – С. 217–221.
4. ГОСТ 2585–81. Выключатели автоматические быстроедействующие постоянного тока. – Введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 30 с.
5. Яковлев В.Н. Автоматические быстроедействующие выключатели постоянного тока: учеб.-метод. пособие. – Самара: Самар. ин-т инженеров железнодорожного транспорта им. М.Т. Елизарова, 2002. – 45 с.
6. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
7. Усов С.В. Электрическая часть электростанций: учеб. для вузов / С.В. Усов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616 с.
8. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. – Ч. 2. – М.: Рольф, 2001. – 256 с.
9. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.
10. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.
11. Абрамович М.И. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М.И. Абрамович и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
12. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в Matlab-Simulink: учеб. – СПб.: Лань, 2013. – 448 с.
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК-Пресс, 2014. – 288 с.

#### Винтоняк Никита Павлович

Аспирант каф. промышленной электроники (ПрЭ) ТУСУРа  
Тел.: +7-953-9-22-24-77  
Эл. почта: nic-nic91@yandex.ru

#### Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор каф. ПрЭ  
Тел.: +7-913-8-21-22-92  
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

**Кабиров Вагиз Александрович**

Зав. лаб. ГПО каф. ПрЭ  
Тел.: +7 (952-8) 88-46-13  
Эл. почта: fva@vipelec.com

**Кобзев Анатолий Васильевич**

Д-р. техн. наук, профессор каф. ПрЭ  
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: akobzev@ie.tusur.ru

**Сулайманов Алмаз Омурзакович**

Канд. техн. наук, зав. каф.  
электроэнергетических систем НИТПУ  
Тел.: +7 (382-2) 56-37-31  
Эл. почта: sao@tpu.ru

Vintonyak N.P., Semenov V.D., Kabirov V.A.,  
Kobzev A.V., Sulaymanov A. O.

**Evaluating the magnitude of the voltage surges in the power supply testing system to load automatic circuit DC breakers when opening**

The article evaluates methods for the calculation of voltage surges occurring in the power source test facility at the primary testing automatic DC circuit breakers. The schemes of modular connection of ballasts are built and the simulation model of the loading process is designed. In addition, the comparative data for calculation and simulation results are provided, confirming the accuracy of the used methods.

**Keywords:** power source, current regulator, auto switch of direct current, inductance, overvoltage, simulation, MATLAB-Simulink.